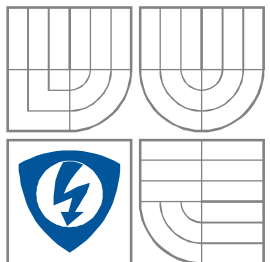


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

MALÝ PROGRAMOVATELNÝ NAPÁJECÍ ZDROJ

SMALL PROGRAMMABLE BENCH POWER SUPPLY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JONÁŠ ČECH

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL KUBÍČEK, Ph.D.

BRNO, 2016



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jonáš Čech

Ročník: 3

ID: 164252

Akademický rok: 2015/16

NÁZEV TÉMATU:

Malý programovatelný napájecí zdroj

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhnete koncepci kompaktního izolovaného laboratorního zdroje napájeného z USB. Zdroj bude umožňovat nastavit výstupní napětí v rozsahu 0 až 16V, bude mít nastavitelné proudové omezení a bude mít ochranu proti podpětí a přepětí na vstupní straně. Ovládání bude realizováno pomocí jednoduchého uživatelského rozhraní na zdroji a zároveň pomocí programu v počítači, který umožní záznam provozních parametrů výstupu zdroje (výstupní proud, dodávaný výkon). Zdroj bude obsahovat displej, který bude zobrazovat základní údaje. Navrhnete schéma zapojení zdroje a ověřte funkčnost klíčových částí zapojení.

Navržený zdroj kompletně realizujte a ověřte jeho vlastnosti (stabilita a přesnost výstupního napětí, zvlnění výstupního napětí, účinnost). Vytvořte software pro monitorování parametrů a obsluhu zdroje pomocí počítače (Windows kompatibilní).

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KAPLAN, E. D., HEGARTY, Ch. J. Understanding GPS: Principles and Applications, Second Edition. Norwood: ARTECH HOUSE, 2006.

[2] DEPRIEST, D. NMEA data [online]. [cit. 24.4.2015]. Dostupné na [www: http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm](http://www.gpsinformation.org/dale/nmea.htm).

Termín zadání: 8. 2. 2016

Termín odevzdání: 26.5.2016

Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:


doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

předseda oborové rady



UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem a konstrukcí kompaktního spínaného napájecího zdroje malého výkonu, napájeného z USB rozhraní. Zdroj umožňuje nastavit výstupní napětí v rozsahu 0 V až 16 V a má nastavitelné proudové omezení. Návrh je proveden tak, aby byla zajištěna galvanická izolace od počítače. Řízení zdroje je prováděno pomocí uživatelského rozhraní přímo na zdroji a zároveň pomocí počítačového softwaru, který umožňuje záznam hodnot výstupního napětí, proudu a výkonu zdroje. V práci jsou uvedeny výsledky měření a simulací.

KLÍČOVÁ SLOVA

Spínaný zdroj, USB, optoizolace, proudový monitor, ATmega, ANSI C, C#

ABSTRACT

This bachelor's thesis deals with design and construction of compact low power switching power supply, which is powered from USB. It provides adjustable output voltage in range from 0 V to 16 V and adjustable current limit. The design is made with respect to galvanic insulation between device and PC. The control of device is done by basic user interface and software, which provide monitoring of output voltage, current and output power. The simulation and measurement results are included.

KEYWORDS

Switching mode power supply, USB, optoisolation, current monitor, ATmega, ANSI C, C#

ČECH, J. *Malý programovatelný napájecí zdroj*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2016. 64 s., 15 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Michal Kubíček, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Malý programovatelný napájecí zdroj jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Michalu Kubíčkovi, Ph.D. za jeho čas v rámci konzultací, vstřícný přístup, jeho užitečné rady při návrhu zapojení a ověřování konstrukce a v neposlední řadě ochotu při poskytování potřebných měřících přístrojů a součástek.

OBSAH

| | |
|--|------------|
| Seznam obrázků | ix |
| Seznam tabulek | xii |
| Úvod | 1 |
| 1 Úvod do napájecích zdrojů | 2 |
| 1.1 Zdroje lineární..... | 2 |
| 1.2 Zdroje spínané..... | 3 |
| 1.2.1 Neizolovaný snižující měnič..... | 5 |
| 1.2.2 Neizolovaný zvyšující měnič..... | 6 |
| 1.2.3 Neizolovaný invertující měnič..... | 6 |
| 1.2.4 Izolovaný propustný měnič..... | 7 |
| 1.2.5 Izolovaný blokující měnič | 8 |
| 1.3 Datová komunikace | 9 |
| 1.3.1 USB..... | 10 |
| 1.3.2 USART | 10 |
| 1.3.3 I2C | 11 |
| 1.3.4 SPI..... | 12 |
| 2 Návrh zdroje | 14 |
| 2.1 Spínaný regulátor LTC3114-1 | 14 |
| 2.1.1 Návrh obvodu | 14 |
| 2.1.2 Vyšetření stability | 17 |
| 2.1.3 Návrh odlehčovacího obvodu | 20 |
| 2.1.4 Simulace navrženého obvodu | 20 |
| 2.2 Napájení řídicí části | 21 |
| 2.3 Regulace napětí a omezení proudu | 22 |
| 2.3.1 Regulace napětí..... | 22 |
| 2.3.2 Omezení proudu..... | 24 |
| 2.4 Vstupní ochrany | 27 |
| 2.4.1 Přepět'ová ochrana | 27 |
| 2.4.2 Podpět'ová ochrana | 27 |
| 2.4.3 Galvanická izolace napájení | 29 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.4.4 | Galvanická izolace datových vodičů | 30 |
| 2.5 | Měření napětí a proudu | 31 |
| 2.6 | Mikrokontrolér ATmega328 | 33 |
| 2.6.1 | Komunikace s periferiemi | 33 |
| 2.6.2 | Komunikace s uživatelem | 34 |
| 2.6.3 | Návrh filtru | 34 |
| 2.7 | Převod USB/UART | 36 |
| 2.8 | Programová část | 38 |
| 2.8.1 | Firmware pro MCU | 38 |
| 2.8.2 | Software pro PC | 43 |
| 2.9 | Rozvaha chlazení | 45 |
| 3 | Konstrukce a měření | 46 |
| 3.1 | Výsledky měření prototypu | 46 |
| 3.2 | Desky plošných spojů | 48 |
| 3.2.1 | Řídící část | 48 |
| 3.2.2 | Napájecí část | 49 |
| 3.3 | Mechanické zpracování | 50 |
| 3.4 | Měření finální verze | 52 |
| 3.4.1 | Zatěžovací charakteristiky | 52 |
| 3.4.2 | Zvlnění výstupního napětí | 54 |
| 3.4.3 | Přesnost výstupního napětí a proudu | 56 |
| 3.4.4 | Účinnost | 58 |
| 3.4.5 | Shrnutí výsledků měření | 59 |
| 4 | Závěr | 60 |
| | Literatura | 61 |
| | Seznam symbolů, veličin a zkratk | 64 |
| A | Návrh zařízení | 65 |
| A.1 | Obvodové zapojení napájecí části zdroje | 65 |
| A.2 | Obvodové zapojení řídicí části zdroje | 66 |
| A.3 | Obvodové zapojení ovládací části zdroje | 67 |
| A.4 | Deska plošného spoje napájecí části – top (strana součástek) | 67 |
| A.5 | Deska plošného spoje napájecí části – bottom (strana spojů) | 68 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| A.6 | Deska plošného spoje řídicí části – top (strana součástek)..... | 68 |
| A.7 | Deska plošného spoje řídicí části – bottom (strana spojů)..... | 69 |
| A.8 | Deska plošného spoje ovládací části – top (strana součástek)..... | 69 |
| A.9 | Deska plošného spoje ovládací části – bottom (strana spojů) | 69 |
| B | Seznam součástek | 70 |
| B.1 | Napájecí část | 70 |
| B.2 | Řídicí část | 72 |
| B.3 | Ovládací část..... | 73 |
| B.4 | Vnější součástky | 73 |
| C | Tabulky naměřených hodnot pro prototyp | 74 |
| C.1 | Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 5,215\text{ V}$ | 74 |
| C.2 | Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 12,1\text{ V}$ | 74 |
| C.3 | Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 16,27\text{ V}$ | 74 |
| D | Tabulky naměřených hodnot pro finální verzi zdroje | 76 |
| D.1 | Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 5,052\text{V}$ | 76 |
| D.2 | Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 11,992\text{V}$ | 76 |
| D.3 | Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 16,045\text{V}$ | 76 |
| D.4 | Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu $U_{out0} = 5,12\text{V}..$ | 77 |
| D.5 | Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu $U_{out0} = 12,06\text{V}$ | 77 |
| D.6 | Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu $U_{out0} = 16,10\text{V}$ | 78 |
| E | Foto výsledného zařízení | 79 |
| E.1 | Funkční zkonstruovaný zdroj..... | 79 |

SEZNAM OBRÁZKŮ

| | | |
|--------------|---|----|
| Obrázek 1.1 | Blokové schéma lineárního zdroje..... | 2 |
| Obrázek 1.2 | Schematické zapojení neřízených usměrňovačů..... | 3 |
| Obrázek 1.3 | Blokové schéma spínaného zdroje..... | 4 |
| Obrázek 1.4 | Zapojení snižujícího měniče | 5 |
| Obrázek 1.5 | Zapojení zvyšujícího měniče | 6 |
| Obrázek 1.6 | Zapojení invertujícího měniče | 7 |
| Obrázek 1.7 | Zapojení propustného měniče s demagnetizačním vinutím..... | 8 |
| Obrázek 1.8 | Zapojení izolovaného blokujícího měniče | 9 |
| Obrázek 1.9 | Komunikační rámec asynchronního přenosu v konfiguraci 8N1 | 11 |
| Obrázek 1.10 | Adresní část komunikačního rámce sběrnice I2C..... | 11 |
| Obrázek 1.11 | Spojení master – multislave pomocí SPI | 13 |
| Obrázek 2.1 | Blokové schéma navrženého zdroje | 14 |
| Obrázek 2.2 | Typické zapojení spínaného regulátoru LTC3114-1. Převzato z [12].... | 15 |
| Obrázek 2.3 | Zapojení spínaného regulátoru LTC3114-1 | 17 |
| Obrázek 2.4 | Stabilita navrženého obvodu pro výstupní napětí 4,99 V – plná čára $I_{out}=0,7$ A, přerušovaná čára $I_{out}=0$ A | 18 |
| Obrázek 2.5 | Stabilita navrženého obvodu pro výstupní napětí 15,89 V | 18 |
| Obrázek 2.6 | Průběh napětí na spínacím tranzistoru MC [12] pro výstupní napětí přibližně 16V a výstupní proud 50mA | 19 |
| Obrázek 2.7 | Průběh napětí na spínacím tranzistoru MC [12] pro výstupní napětí přibližně 16V a výstupní proud 350mA | 19 |
| Obrázek 2.8 | Výsledek simulace výstupního napětí pro hodnotu zatěžovacího odporu (zleva) 1 k Ω a 5 Ω , při výstupním napětí přibližně 5V | 21 |
| Obrázek 2.9 | Výsledek simulace výstupního napětí pro hodnotu zatěžovacího odporu (zleva) 1 k Ω a 40 Ω , při výstupním napětí přibližně 16V | 21 |
| Obrázek 2.10 | Zapojení lineárního stabilizátoru NCP1117 | 22 |
| Obrázek 2.11 | Zapojení zpětnovazebního děliče napětí, [18] | 23 |
| Obrázek 2.12 | Výsledek simulace regulace výstupního napětí | 24 |
| Obrázek 2.13 | Zapojení děliče pro regulaci maximálního výstupního proudu | 25 |
| Obrázek 2.14 | Výsledek simulace regulace maximálního výstupního proudu | 26 |
| Obrázek 2.15 | Zapojení obvodu přepětové ochrany | 27 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Obrázek 2.16 | Zapojení obvodu podpěťové ochrany | 28 |
| Obrázek 2.17 | Simulovaný průběh napájecího a řídicího napětí pro izolovaný měnič.. | 29 |
| Obrázek 2.18 | Zapojení izolovaného DC/DC měniče s řídicím obvodem..... | 30 |
| Obrázek 2.19 | Zapojení optočlenů pro galvanickou izolaci sériového rozhraní | 31 |
| Obrázek 2.20 | Vnitřní blokové zapojení power monitoru INA219. Převzato z [25] | 32 |
| Obrázek 2.21 | Zapojení power monitoru INA219 | 32 |
| Obrázek 2.22 | Zapojení mikrokontroléru ATmega328 s periferiemi..... | 34 |
| Obrázek 2.23 | Časový průběh filtrovaného PWM signálu při střídě 99% a frekvenci 8kHz..... | 36 |
| Obrázek 2.24 | Zvlnění filtrovaného signálu při střídě 50% a frekvenci 8kHz..... | 36 |
| Obrázek 2.25 | Zapojení převodníku FT232R s optočleny | 38 |
| Obrázek 2.26 | Vývojový diagram nekonečné smyčky firmwaru mikrokontroléru..... | 39 |
| Obrázek 2.27 | Struktura komunikačního rámce | 41 |
| Obrázek 2.28 | Struktura jednotlivých bytů z komunikačního rámce | 41 |
| Obrázek 2.29 | GUI počítačového softwaru | 44 |
| Obrázek 2.30 | Náhled na měřená uložená data ve formátu CSV | 45 |
| Obrázek 3.1 | Zatěžovací charakteristika regulátoru pro výstupní napětí 5,215 V naprázdno..... | 47 |
| Obrázek 3.2 | Zatěžovací charakteristika regulátoru pro výstupní napětí 16,27 V naprázdno | 47 |
| Obrázek 3.3 | Osazená DPS řídicí části zdroje (strana součástek vlevo, strana spojů vpravo)..... | 49 |
| Obrázek 3.4 | Osazená DPS napájecí části zdroje (strana součástek vlevo, strana spojů vpravo)..... | 50 |
| Obrázek 3.5 | Plán rozmístění součástek pro uživatelské rozhraní | 51 |
| Obrázek 3.6 | Náhled umístění DPS uvnitř krabičky – boční pohled | 51 |
| Obrázek 3.7 | Umístění osazených DPS v krabičce | 52 |
| Obrázek 3.8 | Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 5,052V$ | 53 |
| Obrázek 3.9 | Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 11,992V$ | 53 |
| Obrázek 3.10 | Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 16,045V$ | 54 |
| Obrázek 3.11 | Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu pro $U_{out0} = 5,12V$ | 55 |
| Obrázek 3.12 | Časový průběh zvlnění výstupního napětí pro $U_{out0} = 5,12V$ a $I_{out} = 400mA$ | 55 |
| Obrázek 3.13 | Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu pro $U_{out0} = 12,06V$ | 56 |

| | | |
|--------------|---|----|
| Obrázek 3.14 | Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu pro $U_{out0} = 16,10V$ | 56 |
| Obrázek 3.15 | Závislost celkové účinnosti zdroje na výstupním proudu..... | 59 |

SEZNAM TABULEK

| | | |
|-------------|---|----|
| Tabulka 1.1 | Vybrané parametry USB rozhraní | 10 |
| Tabulka 1.2 | Možná nastavení rámce asynchronního přenosu | 11 |
| Tabulka 2.1 | Základní parametry spínaného regulátoru LTC3114-1 | 15 |
| Tabulka 2.2 | Závislost velikosti výstupního napětí na velikosti regulačního napětí ... | 24 |
| Tabulka 2.3 | Závislost velikosti maximálního výstupního proudu na velikosti regulačního napětí | 26 |
| Tabulka 2.4 | Napěťové úrovně podpěťové ochrany | 29 |
| Tabulka 2.5 | Základní parametry převodníku FT232R | 37 |
| Tabulka 2.6 | Programové využití pinů jednotlivých portů mikrokontroléru | 40 |
| Tabulka 2.7 | Identifikační tabulka pro přenos hodnot požadovaných veličin | 42 |
| Tabulka 2.8 | Význam jednotlivých hodnot pro příkazy | 42 |
| Tabulka 3.1 | Přesnost výstupního napětí zdroje | 57 |
| Tabulka 3.2 | Přesnost měření výstupního proudu..... | 58 |

ÚVOD

Napájecí zdroje jsou nedílnou součástí většiny elektronických zařízení, jimž poskytují energii pro správnou funkci. Obecně je snaha u napájecích zdrojů dosáhnout co nejlepší účinnosti, z důvodu minimalizace ztrát při přeměně energie. Důraz je také kladen na stabilitu parametrů napájecích zdrojů a to zejména u zdrojů napájejících citlivá elektronická zařízení.

Tato práce se zabývá návrhem a konstrukcí kompaktního izolovaného programovatelného laboratorního napájecího zdroje malého výkonu, napájeného z USB rozhraní. Základním požadavkem na zdroj je možnost nastavení výstupního napětí v rozsahu 0 až 16 V s nastavitelným proudovým omezením. Zdroj je řízen pomocí počítačového softwaru, jenž se zároveň stará o záznam výstupních parametrů, jako výstupní napětí, proud a výkon, a také pomocí jednoduchého uživatelského rozhraní na zdroji. Komunikaci a zobrazování výstupních parametrů na LCD displeji obstarává mikrokontrolér řady AVR.

Práce se nejprve zabývá návrhem a simulováním spínaného DC/DC měniče, který zajišťuje regulaci výstupního napětí a maximálního proudu. Dále jsou řešeny vstupní ochrany zdroje v podobě ochran proti přepětí, podpětí a galvanické izolace od počítače, použité integrované obvody tvořící části bloků zdroje a programová část zařízení. Poslední část práce je věnována konstrukci zdroje a výklad výsledků jeho měřených parametrů.

1 ÚVOD DO NAPÁJECÍCH ZDROJŮ

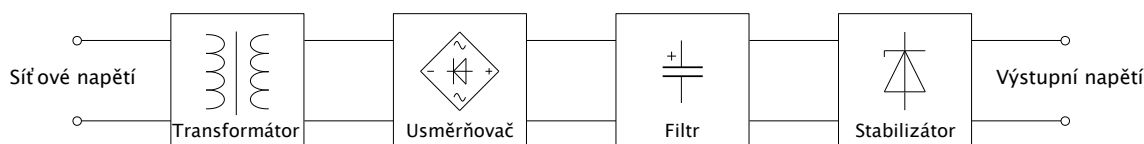
Tato kapitola pojednává o obecné teorii napájecích zdrojů, především o zdrojích spínaných, jelikož základem této práce je návrh zdroje vycházejícího z tohoto konceptu.

1.1 Zdroje lineární

Lineární zdroje jsou napájecí zdroje, využívající lineární řízení regulačních členů. Tyto zdroje předcházely zdrojům spínaným, ovšem i přestože jsou spínané zdroje používány čím dál častěji, dosahují lineární zdroje lepších vlastností, jako například rychlost reakce výstupního napětí na změnu zátěže nebo činitel potlačení zvlnění [1].

Tyto zdroje se skládají ze čtyř základních částí, které na sebe postupně navazují. Těmito částmi jsou síťový transformátor, usměrňovač, filtr a stabilizátor.

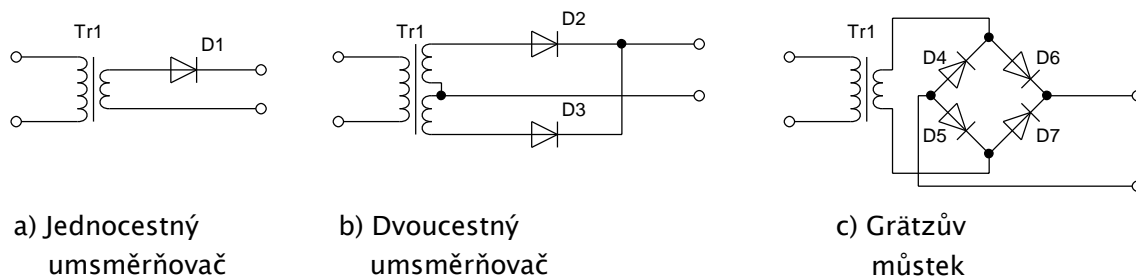
Blokové schéma lineárního zdroje je uvedeno na obrázku 1.1.



Obrázek 1.1 Blokové schéma lineárního zdroje

Síťový transformátor slouží pro transformaci síťového napětí na potřebnou hodnotu a zároveň slouží ke galvanické izolaci výstupního napětí od rozvodné sítě. Použitý může být jak „klasický“ transformátor s EI plechy, tak toroidní transformátor, jež je sice dražší (v porovnání s „EI“ transformátory pro malé výkony), ale má menší rozptylové pole, nižší hlučnost, lepší odvod tepla a menší ztráty [2].

Transformované napětí je třeba dále usměrnit a získat tak stejnosměrné napětí. Toho je docíleno pomocí usměrňovače. Usměrňovače mohou být řízené, neřízené a aktivní. Mezi neřízené usměrňovače, jejichž schematické zapojení je na obrázku 1.2, patří diodové usměrňovače, kdy je napětí usměrněno vhodným uspořádáním polovodičových diod. Dle tohoto uspořádání rozlišujeme jednocestný usměrňovač, dvoucestný usměrňovač a dvoucestný usměrňovač v můstkovém zapojení, známý jako Grätzův můstek.



Obrázek 1.2 Schematické zapojení neřízených usměrňovačů

Jednocestný usměrňovač, dle polarizace diody, propustí pouze jednu půlvlnu vstupního střídavého napětí a je tedy vhodný pro aplikace, kde není požadavek na nízké zvlnění výstupního napětí a velký odběr proudu. Usměrněné napětí na výstupu dvoucestného usměrňovače a Grätzova můstku má stejný průběh. U dvoucestného usměrňovače je použit transformátor se dvěma sekundárními vinutími nebo sekundární vinutí s vyvedeným středem, jako společný vodič. Při použití Grätzova můstku postačuje jedno sekundární vinutí, usměrněné napětí je zmenšeno o úbytek napětí na dvou diodách, na rozdíl od dvoucestného usměrňovače, kde je výstupní napětí menší pouze o úbytek napětí na jedné diodě.

Dalším důležitým prvkem lineárního zdroje, je filtr, který slouží k vyhlazení usměrněného napětí. Nejčastějším prvkem používaným jako filtr, je samotný kondenzátor, který nejdříve akumuluje elektrickou energii a po dosažení amplitudy usměrněného napětí dodává akumulovanou energii do zátěže. Další z možných filtrů jsou RC filtry a nebo LC filtry.

Posledním prvkem lineárního zdroje je stabilizátor. Tato část zdroje není u všech aplikací vyžadována (například u napájecích zdrojů audio zesilovačů). Funkce stabilizátoru napětí spočívá v zachování konstantní hodnoty výstupního napětí při změnách výstupního proudu, vstupního napětí a teploty okolí. Zároveň dokáže stabilizátor potlačit zvlnění výstupního napětí, tento parametr je definován tzv. činitelem potlačení zvlnění. Lze je rozdělit na dvě skupiny, parametrické stabilizátory a zpětnovazební stabilizátory. Parametrické stabilizátory jsou založeny na principu rozdílu mezi statickým a dynamickým odporem nelineárního stabilizačního prvku, kde dynamický odpor je mnohem menší než statický v pracovním bodě. Parametrickým stabilizátorem je například stabilizátor se zenerovou diodou. Zpětnovazební stabilizátory jsou pak založeny na principu řízení regulačního prvku (tranzistoru), který je řízen zesilovačem regulační odchylky. Zesilovač porovnává výstupní hodnotu napětí s požadovanou (referenční) hodnotou. Oproti parametrickým stabilizátorům lze tento typ poměrně snadno regulovat co do velikosti výstupního napětí. Maximální proud tohoto typu stabilizátoru je v diskrétní formě závislý především na použitém tranzistoru [1].

1.2 Zdroje spínané

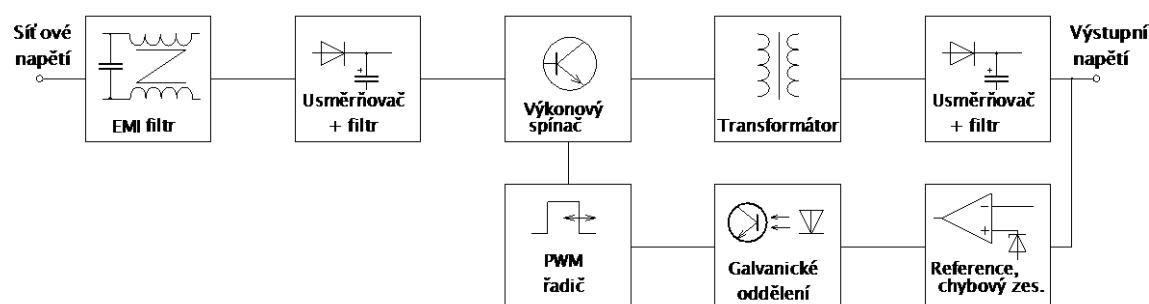
Spínané zdroje jsou napájecí zdroje, které na rozdíl od lineárních zdrojů, využívají impulzní řízení regulačních členů, které pracují v oblasti saturace a zahrazení. Ztrátový výkon na těchto prvcích tedy vzniká pouze v oblasti saturace a při přechodu mezi těmito

dvěma stavy. Tento ztrátový výkon je dán saturačním napětím daného prvku a protékajícím proudem. V době zahrazení tohoto prvku je tedy této ztrátový výkon zanedbatelný. Při přechodu mezi stavy je výkon přímo úměrný době trvání přechodu. Výhodou těchto zdrojů, oproti zdrojům lineárním, je nejen vyšší účinnost, ale také nižší rozměry a hmotnost při stejném výkonu. Naproti tomu, velkou nevýhodou těchto zdrojů je skutečnost, že jsou zdroji VF rušení, s kterým se třeba počítat při návrhu a zvolit vhodnou metodu k jeho omezení. Dále také pomalá reakce na změnu zátěže a vyšší hodnota výstupního zvlnění.

Mohou být rozděleny na dvě kategorie, a to na spínané zdroje pracující s frekvencí sítě a na spínané zdroje pracující s frekvencí vyšší, než je frekvence sítě.

Spínané zdroje pracující s frekvencí sítě, tyto zdroje jsou vhodné pro aplikace, kde nejsou kladeny požadavky na zvlnění výstupního napětí nebo jeho stabilitu a jsou schopny poskytnout velký výkon. Jako spínací prvky jsou v tomto typu zdrojů použity vícevrstvé polovodičové součástky typu tyristor nebo triak [3].

Spínané zdroje s frekvencí vyšší, než frekvence sítě jsou podstatně přesnější a stabilnější, co se týče výstupního napětí a jeho zvlnění, oproti předchozímu typu. Byly rozšířeny zejména díky pokroku v polovodičové technice, jako výroba rychlých výkonových polovodičových prvků. I přes jejich obvodovou složitost a vyšší cenu se díky jejich výhodám velmi rozšířily a dnes jsou již běžně využívány. Blokové schéma spínaného zdroje pracujícího s frekvencí vyšší, než je frekvence sítě, je uvedeno na obrázku 1.3, níže.



Obrázek 1.3 Blokové schéma spínaného zdroje

Spínané DC/DC měniče jsou elektronické obvody, které slouží k regulaci stejnosměrného napětí, které může být podle způsobu zapojení nižší, vyšší, invertované, případně stejné.

Vhodná aplikace těchto neizolovaných DC/DC měničů je především v případě velkého rozdílu mezi vstupním a výstupním napětím nebo v případě potřeby změny napětí při poměrně malém výkonu [4].

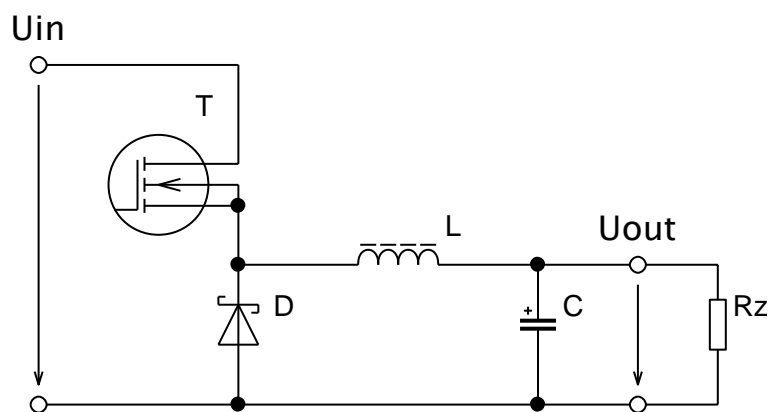
V případě potřeby galvanického oddělení vstupního napětí od výstupního je třeba využít v zapojení transformátor. Na tomto principu jsou založeny izolované měniče. Výhodou těchto zapojení je nejen galvanické oddělení, ale i možnost získání více výstupních napětí a vyšších výstupních výkonů při menších rozměrech.

1.2.1 Neizolovaný snižující měnič

Snižující měnič, nazývaný také Step-down nebo Buck, slouží ke snižování hodnoty vstupního napětí. Na obrázku 1.4, níže, je uvedeno principiální zapojení tohoto měniče.

Pro popsání funkce tohoto i následujících měničů předpokládáme, že je tranzistor T ovládán signálem o proměnné střídě s periodou T .

Při otevření tranzistoru T se elektrický obvod uzavírá přes akumulaci cívku L a zátěž R_z . Za tohoto stavu dochází k akumulaci energie v cívce L ve formě magnetického pole, kondenzátoru C ve formě elektrostatického pole a zároveň je energie dodávána do zátěže R_z ze vstupního zdroje napětí. Po uzavření tranzistoru T dojde k odpojení vstupního zdroje a elektrický obvod se v této fázi uzavírá přes diodu D . Za tohoto stavu, je energie do zátěže dodávána z cívky L a kondenzátoru C [4].



Obrázek 1.4 Zapojení snižujícího měniče

Velikost výstupního napětí tohoto měniče je vždy nižší nebo rovna velikosti vstupního napětí a je dána vztahem

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot s, \quad (1.1)$$

kde U_{out} je velikost výstupního napětí ve V, U_{in} velikost vstupního napětí ve V a s střída spínání tranzistoru T. Střída nabývá hodnoty v intervalu od 0 do 1 a ze vztahu 1.2 je patrné, že při $s=1$ (maximální střída) je výstupní napětí rovno vstupnímu, s klesající hodnotou střídý pak výstupní napětí klesá.

Střidu spínání lze spočítat jako

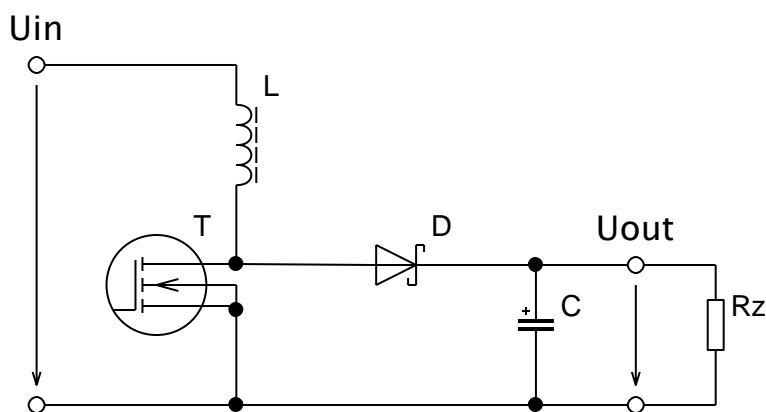
$$s = \frac{t_{\text{ON}}}{t_{\text{ON}} + t_{\text{OFF}}}, \quad (1.2)$$

kde t_{ON} je doba sepnutí tranzistoru T a t_{OFF} je doba uzavření tranzistoru T. Tento vztah je obecně platný.

1.2.2 Neizolovaný zvyšující měnič

Zvyšující měnič, nazývaný také Step-up nebo Boost, slouží ke zvyšování hodnoty vstupního napětí. Na obrázku 1.5, níže, je uvedeno principiální zapojení tohoto měniče.

Při otevření tranzistoru T se elektrický obvod uzavírá přes akumulaci cívku L. Za tohoto stavu dochází k akumulaci energie v cívce L ve formě magnetického pole. Dioda D zabraňuje nežádoucímu vybití kondenzátoru C, přes otevřený tranzistor T. Kondenzátor C dodává energii do zátěže. Po uzavření tranzistoru T se cívka stává zdrojem napětí, který je sériově spojen se vstupním zdrojem, a tedy výstupní napětí je dáno součtem napětí těchto dvou zdrojů. V tomto stavu je obvod uzavřen přes cívku L, diodu D a zátěž R_z . Současně dochází k nabíjení kondenzátoru C [4].



Obrázek 1.5 Zapojení zvyšujícího měniče

Velikost výstupního napětí tohoto měniče je vždy vyšší nebo rovna velikosti vstupního napětí a je dána vztahem

$$U_{\text{out}} = U_{\text{in}} \cdot \frac{1}{1 - s}, \quad (1.3)$$

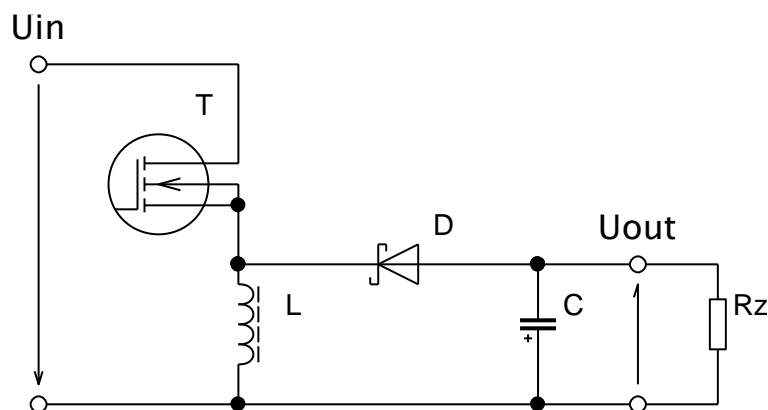
kde U_{out} je velikost výstupního napětí, U_{in} velikost vstupního napětí a s střída spínání tranzistoru T. Střída nabývá hodnoty v intervalu od 0 do 1 a ze vztahu je patrné, že při s limitně se blížící 1 (maximální střída) je hodnota výstupního napětí nekonečně velká, s klesající hodnotou s pak klesá až do stavu, kdy je výstupní napětí rovno vstupnímu.

1.2.3 Neizolovaný invertující měnič

Invertující měnič, slouží primárně k invertování polaroty vstupního napětí, ovšem z principu jeho činnosti může být jeho velikost větší nebo menší než velikost vstupního napětí. Na obrázku 1.6, níže, je uvedeno principiální zapojení tohoto měniče.

Při otevření tranzistoru T se elektrický obvod uzavírá přes akumulaci cívku L. Za tohoto stavu dochází k akumulaci energie v cívce L ve formě magnetického pole. Dioda D zabraňuje nežádoucímu vybíjení kondenzátoru C přes cívku L. Kondenzátor C dodává energii do zátěže při stavu otevření tranzistoru. Po uzavření tranzistoru T se

cívka stává zdrojem elektrické energie a dojde tedy k obrácení polarity jejího napětí. V tomto stavu je obvod uzavřen přes cívku L, diodu D a zátěž R_z . Současně dochází k nabíjení kondenzátoru C [4].



Obrázek 1.6 Zapojení invertujícího měniče

Velikost výstupního napětí tohoto měniče je vyšší, menší nebo rovna velikosti vstupního napětí a je dána vztahem

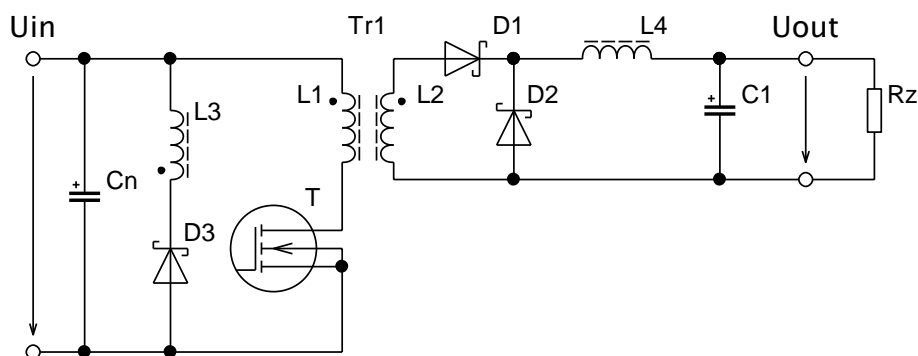
$$U_{\text{out}} = -U_{\text{in}} \cdot \frac{s}{1-s} \quad (1.4)$$

1.2.4 Izolovaný propustný měnič

Propustný měnič, nazývaný také Forward, slouží ke snižování ale i zvyšování hodnoty výstupního napětí. Označení „propustný“ vzešlo z principu funkce tohoto měniče, a to konkrétně ze stavu, ve kterém je současně energie do měniče dodávána, i z měniče odebírána. Na obrázku 1.7, níže, je uvedeno principiální zapojení tohoto měniče s pomocným demagnetizačním vinutím.

Při otevření tranzistoru T se elektrický obvod uzavírá přes primární vinutí transformátoru L1. Jelikož je orientace začátku vinutí transformátoru stejná, má napětí indukované na sekundární straně transformátoru L2 stejnou polaritu, jako napětí na primární straně. Za tohoto stavu je dioda D1 polarizována v propustném směru a obvod se uzavírá přes tuto diodu, cívku L4 a zátěž R_z . Současně dochází k nabíjení kondenzátoru C1. Vzhledem k polarizaci diody D3 vůči vstupnímu napětí U_{in} proud demagnetizačním vinutím neteče. Po uzavření tranzistoru T dojde ke změně polarizace napětí na všech vinutích L1 až L3 a cívice L4. V tomto stavu se cívka L4 stává zdrojem, dochází tedy k uzavření obvodu přes zatěžovací odpor R_z a diodu D2. Kondenzátor C1 se podílí na proudu procházejícím odporem R_z . Dioda D1 je závěrně polarizována, ze sekundárního vinutí transformátoru L2 není tedy odebírána žádná energie. Při otevření tranzistoru T není ale vinutí L2 schopno dodávat energii po celou dobu, ale jen po určitou část, kdy je napětí na tomto vinutí větší, než součet napětí na diodě D1, cívice L4 a odporu R_z . Pokud je napětí na vinutí L2 menší než tento součet napětí, dioda D1 je závěrně polarizována a část energie zůstává v magnetickém poli transformátoru

zachována. Následně by docházelo ke zvyšování napětí na vinutí L1, dokud by nebyl, tímto napětím, proražen tranzistor T. Tomuto stavu se zabráňuje například zapojením se zenerovou diodou nebo následně popsáním zapojením s demagnetizačním vinutím, jehož výhodou je zajištění návratu zbylé energie z jádra zpět do zdroje, čímž nedojde ke snížení účinnosti, jako je tomu v případě použití zapojení se zenerovou diodou. Při uzavření tranzistoru T tedy dojde ke změně polarity napětí na cívkce L3, která má větší počet závitů než cívka L1 (napětí na cívkce L3 je tedy větší než vstupní napětí U_{in}), a následnému otevření diody D3, což způsobí nabití kondenzátoru C3, případně kondenzátorů vstupního zdroje [1] [4].



Obrázek 1.7 Zapojení propustného měniče s demagnetizačním vinutím

Velikost výstupního napětí tohoto měniče je vyšší, menší nebo rovna velikosti vstupního napětí a je dána vztahem

$$U_{out} = U_{in} \cdot s \cdot \frac{N_2}{N_1}, \quad (1.5)$$

kde N_2 je počet závitů sekundárního vinutí transformátoru Tr1, N_1 počet závitů primárního vinutí transformátoru Tr1.

Aby došlo k demagnetizaci jádra transformátoru Tr1 za dobu kratší, než je doba T_{off} , musí být omezena střída spínání tranzistoru T na maximální hodnotu, která je dána vztahem

$$s_{max} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{on} \cdot \frac{N_3}{N_1}}, \quad (1.6)$$

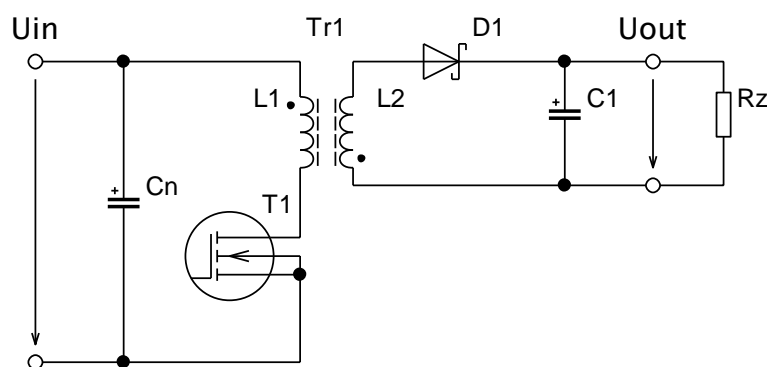
kde N_3 je počet závitů demagnetizačního vinutí L3.

1.2.5 Izolovaný blokuující měnič

Blokuující měnič, nazývaný také akumulující nebo Flyback, slouží ke snižování ale i zvyšování hodnoty výstupního napětí. Označení „akumulující“ vzešlo z principu funkce tohoto měniče, a to konkrétně ze stavu, ve kterém je energie v první fázi akumulována

v jádru transformátoru a v druhé fázi je tato energie odebírána sekundárním vinutím. Na obrázku 1.8, níže, je uvedeno principiální zapojení tohoto měniče.

Při otevření tranzistoru T se elektrický obvod uzavírá přes primární vinutí transformátoru L1. Při průchodu proudem primárním vinutím L1 je do sekundárního vinutí L2 indukováno napětí opačné polarity vůči napětí primárního vinutí L1. Za tohoto stavu dochází k akumulaci energie ve formě magnetického pole v jádře transformátoru Tr1. Dioda D1 je polarizována závěrně a zabraňuje průchodu proudem sekundárním vinutím L2, do zátěže dodává energii kondenzátor C1. Po uzavření tranzistoru T dojde ke změně polarit napětí na obou vinutích transformátoru Tr1. Na sekundární straně je pak dioda D1 polarizována v propustném směru a obvod je uzavřen přes tuto diodu a zatěžovací odpor R_z . Zároveň dochází k nabíjení kondenzátoru C1. Přepětí, které vznikne na primárním vinutí L1 je omezeno stavem, kdy sekundárním vinutím L2 začne procházet proud a je tedy odebírána akumulovaná energie z jádra transformátoru Tr1. Pro případy, kdy by docházelo k velkému přepětí na primárním vinutí L1 z důvodu malého odběru na sekundární straně, či dalšími reálnými parametry transformátoru (například rozptylový tok primárního vinutí L1) se vstupní část doplňuje demagnetizačním vinutím, jako v případě propustného měniče, či jinými vhodnými ochranami [1] [4].



Obrázek 1.8 Zapojení izolovaného blokujícího měniče

Velikost výstupního napětí tohoto měniče je vyšší, menší nebo rovna velikosti vstupního napětí a je dána vztahem

$$U_{out} = U_{in} \cdot \frac{s}{1-s} \cdot \frac{N_2}{N_1} \quad (1.7)$$

1.3 Datová komunikace

Datovou komunikaci lze rozdělit podle mnoha kritérií (paralelní – sériová, synchronní – asynchronní, dle způsobu kódování NRZ – RZ, apod.). V práci jsou využity celkem čtyři sběrnice, které jsou popsány níže. Ty byly vybrány s ohledem na vlastnosti použitých součástek a obtížnost implementace do zařízení.

1.3.1 USB

Univerzální sériová sběrnice (USB) je průmyslový standart, dnes již rozšířený a hojně využívaný, vyvinutý v roce 1990 zahrnující definice použitých konektorů, vodičů a komunikačních protokolů. USB umožňuje získání napájení přímo ze sběrnice pro připojené zařízení, připojení až 127 zařízení, která lze kdykoliv připojit bez nutnosti restartu systému či manuální konfigurace komunikace s tímto zařízením [5].

Za dobu existence USB bylo definováno mnoho verzí tohoto rozhraní. V tabulce 1.1, níže, jsou shrnuty některé parametry USB verzí 2.0, 3.0 a 3.1 [6].

Tabulka 1.1 Vybrané parametry USB rozhraní

| Verze USB | Mód | Bitová rychlost [Mb/s] | Rozsah výstupního napětí [V] | Maximální výstupní proud [mA] |
|-----------|---------------------------------|------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| 2.0 | Low speed | 1,5 | 4,75 – 5,25 | 500 |
| | Full speed | 12 | | |
| | High speed | 480 | | |
| 3.0 | SuperSpeed | 5 000 | 4,45 – 5,25 | 900 |
| 3.1 | Enhanced SuperSpeed USB – Gen 1 | 5 000 | 4,45 – 5,25 | 900 |
| | Enhanced SuperSpeed USB – Gen 2 | 10 000 | | |

Z důvodu použití převodníku USB/UART probíhá komunikace, z pohledu počítače a MCU, přes sériový port.

Díky univerzálnosti USB sběrnice je využívána ve velké většině elektroniky přenosných zařízení, jako jsou paměťová zařízení (flash a hard disky, apod), mobilní telefony a další.

1.3.2 USART

Univerzální synchronní a asynchronní přijímač/vysílač (USART) je komunikační jednotka zajišťující sériovou komunikaci mezi zařízeními. Může být nastavena na asynchronní přenos nebo synchronní přenos.

Při asynchronním přenosu se využívají pro komunikaci pouze dvě datové linky, RxD určená pro příjem a TxD pro odesílání dat, synchronizační linka není u tohoto typu přenosu využita. Vysílač může data odeslat v jakémkoliv okamžiku a s libovolně dlouhým odstupem. V klidovém stavu jsou obě linky ve vysoké logické úrovni [7].

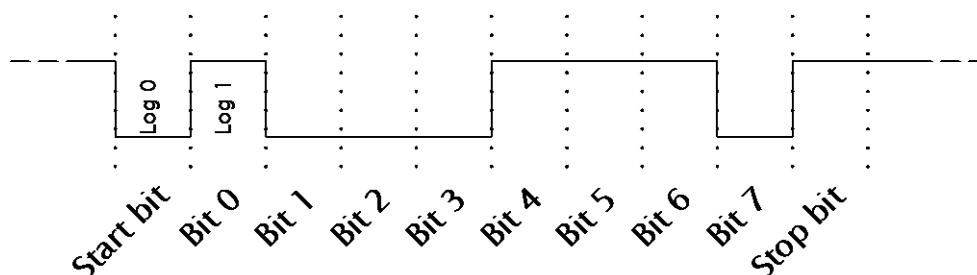
Pro zajištění správné komunikace obou zařízení je nutné je předem nakonfigurovat. Tabulka 1.2 shrnuje některé z možných nastavení rámce asynchronního přenosu. Tato konfigurace spočívá v nastavení přenosové rychlosti, počtu datových bitů, parity a počtu stop bitů v obou zařízeních. Aby bylo možné korektně identifikovat data,

je přijímaný signál vzorkován 16x vyšší frekvencí než je datová rychlost. Tímto převzorkováním je zajištěna korektní identifikace dat a odolnost přijímače vůči falešným start bitům [8].

Tabulka 1.2 Možná nastavení rámce asynchronního přenosu

| Počet datových bitů | Parita | Počet stop bitů |
|---------------------|--------------------|-----------------|
| 5, 6, 7, 8, 9 | žádná, sudá, lichá | 1, 2, 1,5 |

Příklad komunikačního rámce asynchronního přenosu, v konfiguraci 8N1, je znázorněn na obrázku 1.9 níže. Konfigurace 8N1 značí použití 8 datových bitů, žádnou paritu a jeden stop bit.

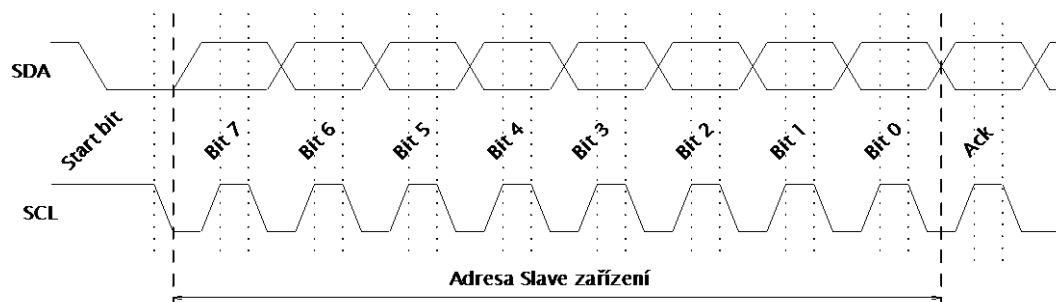


Obrázek 1.9 Komunikační rámec asynchronního přenosu v konfiguraci 8N1

Při synchronním přenosu jsou využity tři linky, dvě datové, jako v případě asynchronního přenosu a jedna synchronizační linka s hodinovým signálem. Vysílač neustále vysílá data, která jsou oddělena synchronizačními symboly, sloužící také k synchronizaci hodinového signálu na straně přijímače. Pokud nejsou k dispozici žádná data k odeslání, jsou vysílány pouze synchronizační symboly.

1.3.3 I2C

I2C je sériová sběrnice vyvinutá firmou Philips Semiconductor roku 1982, využívaná pro nízko rychlostní komunikaci mezi mikrokontroléry, pamětmi, A/D převodníky a dalšími obvody kompatibilními s touto sběrnicí. Komunikace probíhá mezi dvěma typy zařízení, Master a Slave využívá pouze dva obousměrné vodiče, jeden datový (SDA) a druhý synchronizační s hodinovým signálem (SCL), které jsou primárně nastaveny na vysokou úroveň pomocí dvou pull-up rezistorů. Adresní část komunikačního rámce této sběrnice je zobrazena na obrázku 1.10, níže.



Obrázek 1.10 Adresní část komunikačního rámce sběrnice I2C

Díky 7bitovému adresnímu prostoru může být na sběrnici teoreticky připojeno až 128 podřízených zařízení (SLAVE). Reálně je počet zařízení také omezen celkovou maximální kapacitou sběrnice 400 pF [9].

Každý datový bit, přenášený po sběrnici, je spojen s SCL signálem z důvodu správného vyhodnocení. Platí, že po dobu vysoké úrovně na lince SCL musí být úroveň bitu na lince SDA stabilní. Tato podmínka se nevztahuje na start a stop bit. Start bit je tvořen sestupnou hranou na lince SDA při vysoké úrovni na SCL. Stop bit je tvořen nástupnou hranou na lince SDA při vysoké úrovni na SCL.

Komunikaci začíná vždy nadřazené zařízení (MASTER) vysláním start bitu. Za ním následují dva 9bitové pakety, v pořadí adresní a pak datový. Ukončení probíhá vysláním stop bitu. Potvrzení přijetí každého paketu je signalizováno tzv. ACK bitem (acknowledge), ten je tvořen vysokou úrovní vysílacího zařízení a k jeho potvrzení dojde „stažením“ linky SDA na nízkou úroveň ujímacím zařízením.

Sběrnice TWI využívána firmou Atmel je plně kompatibilní se sběrnici I2C [10].

1.3.4 SPI

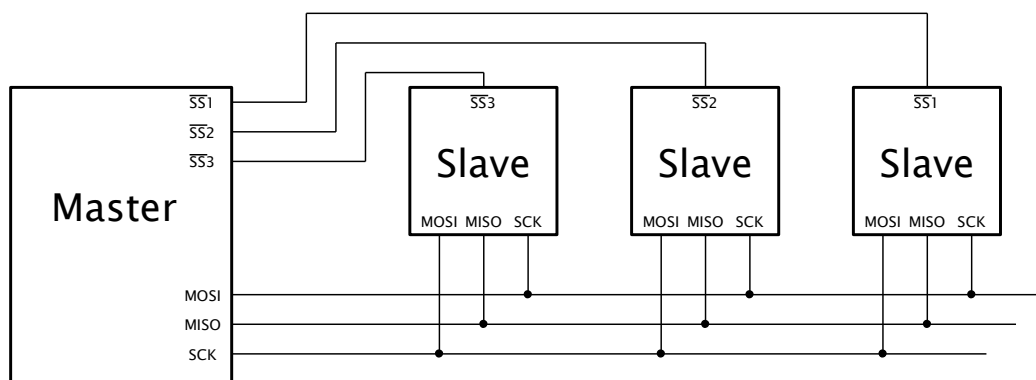
SPI neboli Serial Peripheral Interface je sériová sběrnice používaná pro vysokorychlostní synchronní přenos dat mezi mikrokontroléry a ostatními periferiemi, jako například A/D převodníky, LCD displeje, paměti EEPROM apod.

Ke komunikaci jsou využívány nejméně 4 vodiče při komunikaci s jedním Slave zařízením, při komunikaci s více Slave zařízeními, je pro každé toto zařízení nutné vyvést signál /SS, zbylé signály, kterými jsou hodinový signál SCK, výstup z Master zařízení MOSI (Master Input Slave Output) a vstup pro Slave zařízení MISO (Master Input Slave Output). Propojení zařízení Master se třemi Slave zařízeními je zobrazeno na obrázku 1.11.

Pro zahájení komunikace nastaví Master signál /SS do logické nuly pro zařízení, se kterým chce komunikovat. Spustí se generování SCK hodinového signálu, pro synchronizaci přenosu dat a proběhne přenos jak po lince MOSI tak po lince MISO, pokud má dané zařízení data k dispozici.

Výhoda této sběrnice spočívá v rychlém synchronním přenosu, možnosti komunikace s více Slave zařízeními a využití jednoduchého posuvného registru v přijímači [11].

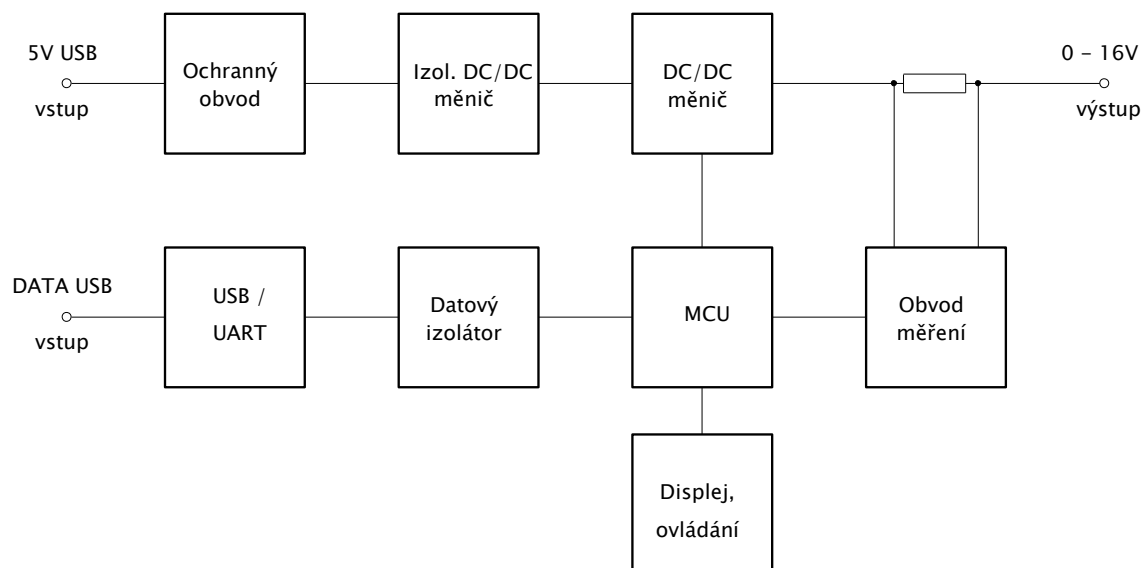
Nevýhoda této sběrnice je nutnost použití více vodičů při komunikaci s více Slave zařízeními nebo také v tom, že je třeba „oslovovat“ každé Slave zařízení zvlášť.



Obrázek 1.11 Spojení master – multislave pomocí SPI

2 NÁVRH ZDROJE

Tato kapitola se zabývá podrobným návrhem zadaného kompaktního regulovatelného napájecího zdroje s napájením z USB, jehož jednotlivé bloky a důležité části jsou popsány v následujících podkapitolách. Blokové schéma navrženého zdroje je uvedeno na obrázku 2.1.

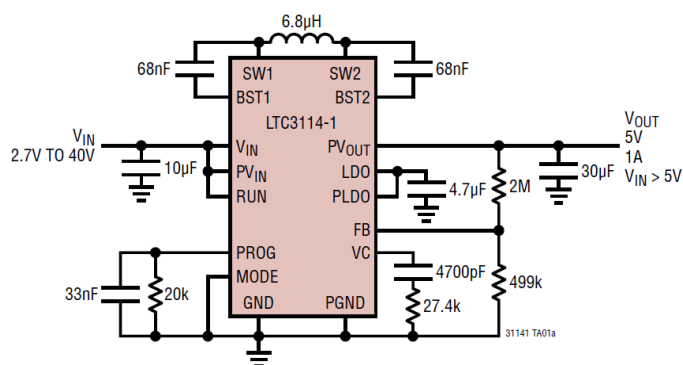


Obrázek 2.1 Blokové schéma navrženého zdroje

2.1 Spínaný regulátor LTC3114-1

2.1.1 Návrh obvodu

Jádrem samotného zdroje je integrovaný spínaný regulátor LTC3114-1 firmy Linear Technology. Jedná se o koncepci typu Buck-Boost, což je kombinace snižujícího i zvyšujícího měniče s maximálním rozsahem vstupního i výstupního napětí 40 V a výstupním proudem 1 A pro buck mód. Pro boost mód je maximální výstupní proud závislý na vstupním napětí. Obvod disponuje nastavitelným proudovým omezením od hodnot proudu přibližně 250 mA, případně nižších [12] a je dostupný v SMD pouzdrů DFN a TSSOP. Základní vlastnosti obvodu jsou shrnuty v tabulce 2.1, níže, typické zapojení výrobce je pak na obrázku 2.2.



Obrázek 2.2 Typické zapojení spínaného regulátoru LTC3114-1. Převzato z [12]

Tabulka 2.1 Základní parametry spínaného regulátoru LTC3114-1

| Parametr | Hodnota |
|---------------------------------------|---------|
| Minimální vstupní napětí | 2,2 V |
| Maximální vstupní napětí | 40 V |
| Minimální výstupní napětí | 2,7 V |
| Maximální výstupní napětí | 40 V |
| Maximální výstupní proud (BUCK mód) | 1 A |
| Maximální účinnost | 96 % |
| Spínací frekvence (typ.) | 1,2 MHz |
| Klidový proud (BURST mód, bez zátěže) | 30 µA |

Použité součástky byly zvoleny z doporučených rozmezí hodnot uvedených v datasheetu [12]. Schematické zapojení navrženého spínaného regulátoru je zobrazeno na obrázku 2.3.

Použitá cívka L2 má vyšší hodnotu, než doporučené rozmezí, jelikož při praktických testech toto zapojení prokazovalo lepší parametry. Proudové zvlnění v buck a boost režimu se vypočítá dle vztahů 2.1, resp. 2.2

$$\Delta I_{L(P-P)(BUCK)} = \frac{U_{OUT}}{L} \cdot \left(\frac{U_{IN} - U_{OUT}}{U_{IN}} \right) \cdot \left(\frac{1}{f} - t_{LOW} \right), \quad (2.1)$$

$$\Delta I_{L(P-P)(BOOST)} = \frac{U_{IN}}{L} \cdot \left(\frac{U_{OUT} - U_{IN}}{U_{OUT}} \right) \cdot \left(\frac{1}{f} - t_{LOW} \right), \quad (2.2)$$

kde U_{out} je výstupní napětí ve V, U_{in} vstupní napětí ve V, L hodnota indukčnosti cívky v µH, f frekvence spínání v Hz a t_{LOW} minimální doba sepnutí spínacích tranzistorů v µs.

Kondenzátory C14 a C19, připojené k vývodům cívky a pinům SW1 a SW2 regulátoru, slouží ke správnému řízení vnitřních tranzistorů, v blokovém schématu označených A a D. Jejich hodnota vychází z požadavku výrobce.

Výstupní kondenzátor byl zvolen nad doporučený rozsah kapacit, s celkovou hodnotou 240,1 μF [12]. Skládá se z paralelního spojení dvou keramických kondenzátorů s hodnotou 10 μF , jednoho keramického kondenzátoru 100 nF a 10p a jednoho hliníkového elektrolytického kondenzátoru s hodnotou kapacity jmenovité kapacity 220 μF . Všechny keramické kondenzátory mají nízký ESR s katalogovou hodnotou 6 m Ω při frekvenci 1 MHz pro kapacitu 10 μF a 20 m Ω při frekvenci 1 MHz pro zbylé, jejich paralelním zapojením bylo dosaženo snížení ESR. Minimální požadovaná hodnota vstupního kondenzátoru je 6,8 μF s požadavkem na nízký ESR, oproti typickému zapojení, kde je tato hodnota 10uF se při praktických testech osvědčila hodnota vyšší, proto byla zvolena hodnota 240 μF , popsána výše.

Napětové zvlnění výstupního napětí v buck a boost režimu se vypočítá dle vztahů 2.3, resp. 2.4

$$\Delta U_{P-P(\text{BUCK})} = \frac{I_{\text{LOAD}} \cdot t_{\text{LOW}}}{C_{\text{OUT}}}, \quad (2.3)$$

$$\Delta U_{P-P(\text{BOOST})} = \frac{I_{\text{LOAD}}}{f \cdot C_{\text{OUT}}} \cdot \left(\frac{U_{\text{OUT}} - U_{\text{IN}} + t_{\text{LOW}} \cdot f \cdot U_{\text{IN}}}{U_{\text{OUT}}} \right), \quad (2.4)$$

kde I_{LOAD} je výstupní proud regulátoru v A, C_{OUT} hodnota kapacity výstupního kondenzátoru v μF .

Zpětnovazební odporový dělič je tvořen rezistory R17 a R18, k tomuto základnímu zapojení je připojen ještě rezistor R19. Tento dělič slouží k nastavení požadovaného výstupního napětí, které je řízeno proměnným napětím z mikrokontroléru. Detailní popis je uveden v kapitole 2.3, níže.

Paralelní kombinace rezistoru R14 a kondenzátoru C9 slouží k nastavení maximální střední hodnoty výstupního proudu, jehož hodnota je úměrná úbytku napětí na rezistoru R14 připojenému k PROG pinu. K tomuto pinu je dále připojen rezistor R12, díky kterému je možné nastavit předpětí na PROG pinu. Funkce této části obvodu je blíže popsána v kapitole 2.3, níže.

K pinu VC jsou připojeny tři kompenzační prvky, které zajišťují stabilitu zpětné vazby. Výpočet těchto prvků byl proveden dle vztahů v aplikační části datasheetu [12] a následně ověřen a doladěn pomocí softwarového nástroje LTpowerCAD poskytovaným výrobcem obvodu, více v kapitole 2.12.

Obvod také umožňuje nastavit spouštěcí úroveň vstupního napětí, při které dojde k jeho zapnutí. Toto nastavení se provádí pomocí odporového děliče, jehož vstup je připojen na vstupní napětí obvodu a výstup na pin RUN. Obvod spouštění je vybaven zabudovanou hysterezí s hodnotou přibližně 140 mV, jež zabraňuje kmitání obvodu při růstu, případně klesání, hodnoty spouštěcího napětí. Výpočet hodnot odporů tohoto děliče se provede dle vztahu 2.5, ovšem v tomto zapojení je pin RUN přímo připojen na pin mikrokontroléru k přímému spouštění měniče.

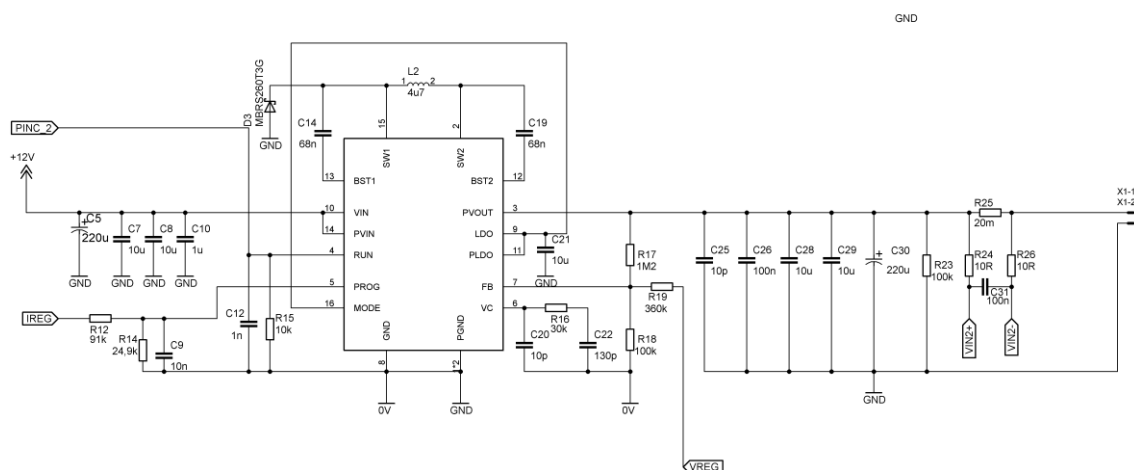
$$U_{\text{TURNOn}} = 1,205 \cdot \left(1 + \frac{R_9}{R_{13}}\right), \quad (2.5)$$

kde U_{TURNOn} je spouštěcí úroveň vstupního napětí při které dochází ke spuštění měniče ve V.

Kondenzátor C21 slouží pro stabilizaci výstupního napětí integrovaného stabilizátoru pro vnitřní řídicí obvody.

Dioda D3 byla do datasheetu přidána v březnu 2016 v rámci nové revize, kde došlo ke změně popisu funkce nastavení maximálního výstupního proudu, což ovlivnilo návrh zdroje. Tato dioda slouží k ochraně obvodu při rychlých změnách vstupního napětí za použití dvouvrstvé DPS. K těmto rychlým změnám může dojít v důsledku vnitřní ochrany izolovaného DC/DC měniče při jeho přetížení, případně při reakci podpěťové ochrany na vstupu zdroje, které způsobí jeho vypnutí.

Součástky R24, R25, R26 a C31 využívá obvod měření proudu a jejich funkce je blíže popsána v kapitole 2.5.



Obrázek 2.3 Zapojení spínaného regulátoru LTC3114-1

2.1.2 Vyšetření stability

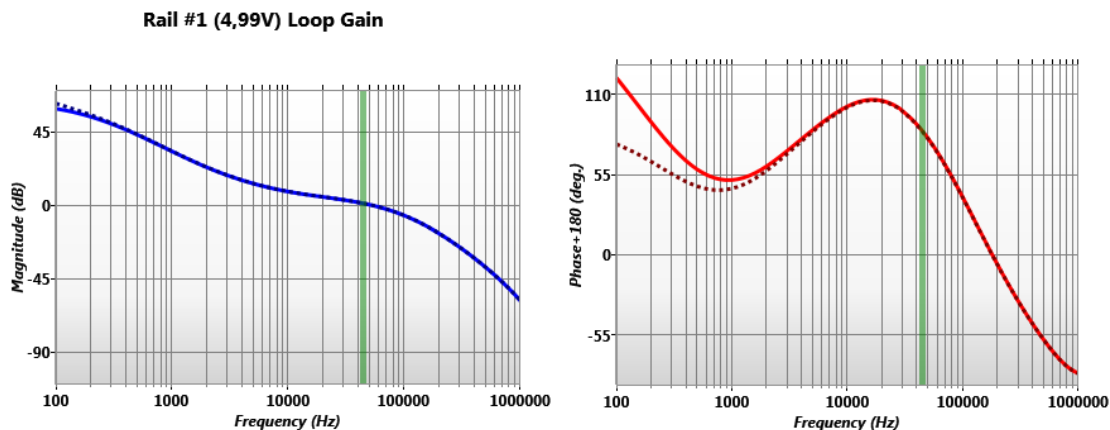
Vzhledem ke skutečnosti, že je pro nastavování výstupního napětí využíváno principu zpětné vazby, je nutné se také věnovat její stabilitě.

Hlavním cílem je zabránění stavu, platnosti oscilačních podmínek, tedy situaci, kdy celkový přenos systému je roven jedné (0 dB) a zároveň je celková fáze rovna -360° [13]. Za tohoto stavu dojde ke kmitání výstupního napětí.

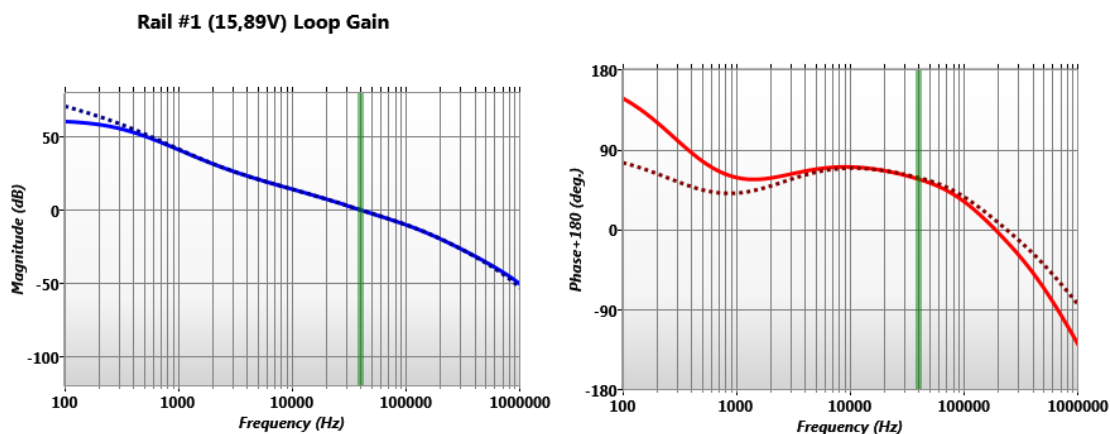
Vzhledem k tomu, že zdroj je provozován ve větším rozsahu výstupních napětí a zatížení, byl pro vyšetření stability využit návrhový software LTpowerCAD II. Základní kompenzační součástky byly vypočítány dle vztahů v [12] a následně upraveny tak, aby bylo dosaženo stability v celém rozsahu. Na obrázku 2.4 a 2.5 je zobrazena fázová i

přenosová frekvenční charakteristika navrženého obvodu pro dvě různá výstupní napětí s rozdílným zatížením. Z těchto charakteristik je patrné, že pro obě výstupní napětí, kdy je zdroj jednou zatížen maximálním proudem (hodnota získaná měřením při testování prototypu) a jednou naprázdno, je zamezeno vzniku oscilačních podmínek a zároveň dodržen doporučený fázový zdvih, při tranzitní frekvenci, vyšší než 45° .

Jak již bylo zmíněno v kapitole 2.1.1, kapacita výstupního kondenzátoru byla zvolena nad doporučený rozsah a to hlavně z toho důvodu, že toto zvýšení způsobí zlepšení stability [14].



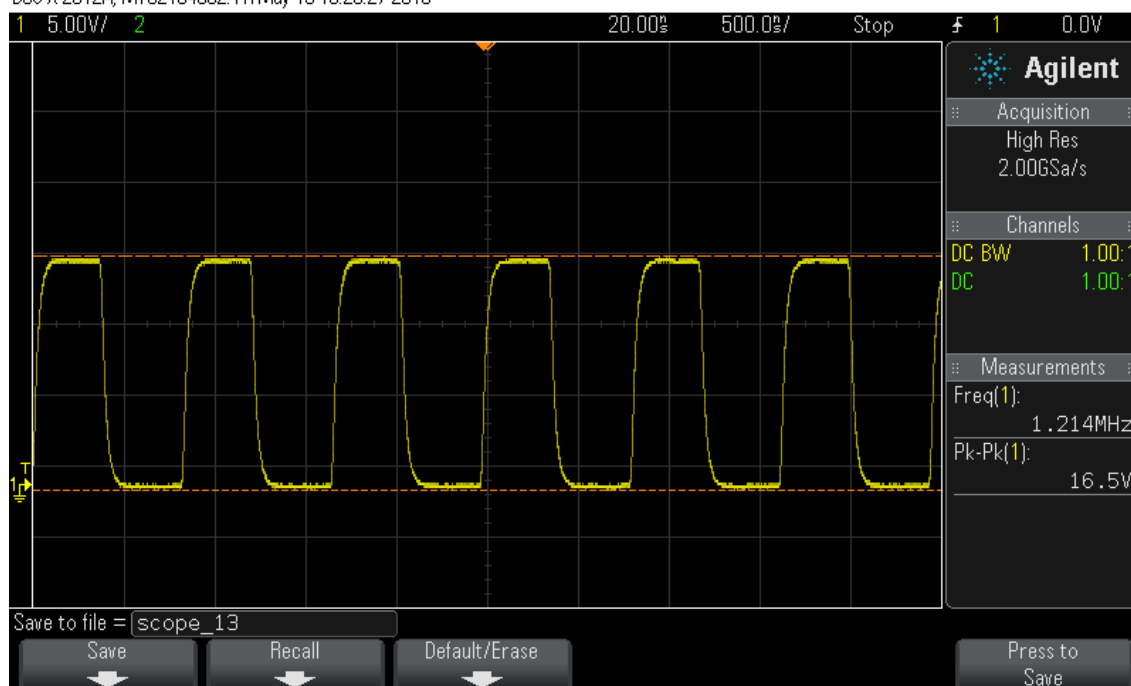
Obrázek 2.4 Stabilita navrženého obvodu pro výstupní napětí 4,99 V – plná čára $I_{\text{out}}=0,7$ A, přerušovaná čára $I_{\text{out}}=0$ A



Obrázek 2.5 Stabilita navrženého obvodu pro výstupní napětí 15,89 V
– plná čára $I_{\text{out}}=0,3$ A, přerušovaná čára $I_{\text{out}}=0$ A

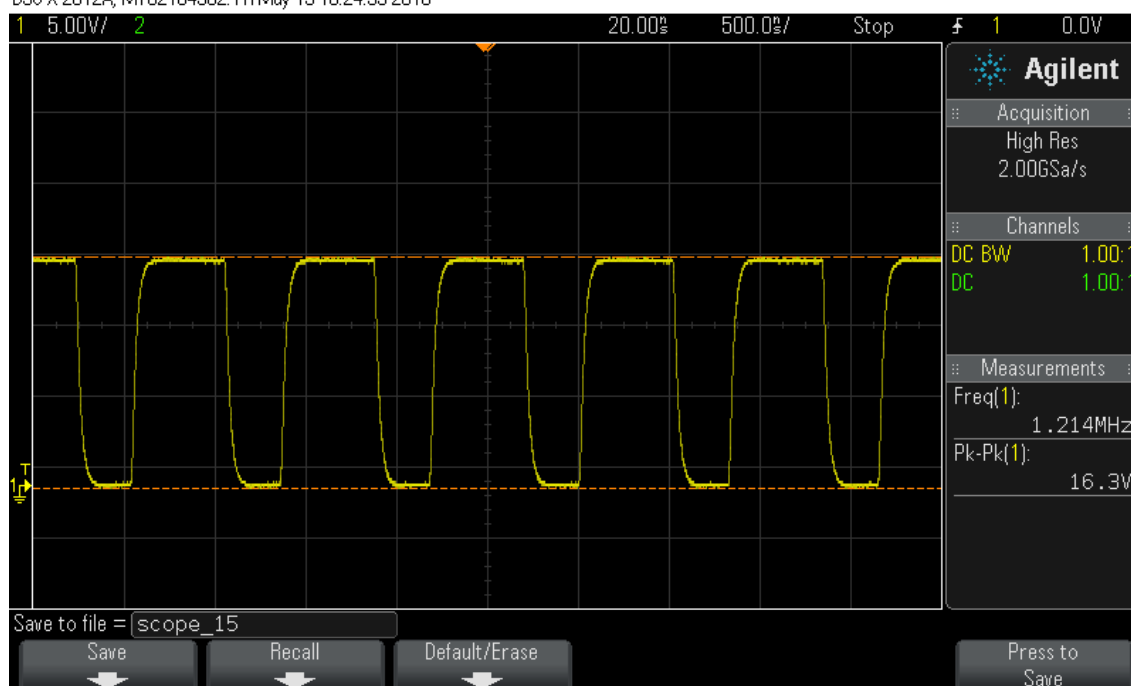
Na obrázku 2.6 a 2.7 je zobrazen oscilogram zachycující průběh napětí na dvou vnitřních spínacích tranzistorech tohoto měniče pro dva různá výstupní proudy. Z průběhů je patrné, že je obvod správně vykompenzován a výstupní napětí je tedy stabilní, průběhy totiž neobsahují žádné výše popsané tlumené kmity.

DSO-X 2012A, MY52164382: Fri May 13 16:23:27 2016



Obrázek 2.6 Průběh napětí na spínacím tranzistoru MC [12] pro výstupní napětí přibližně 16V a výstupní proud 50mA

DSO-X 2012A, MY52164382: Fri May 13 16:24:39 2016



Obrázek 2.7 Průběh napětí na spínacím tranzistoru MC [12] pro výstupní napětí přibližně 16V a výstupní proud 350mA

2.1.3 Návrh odlehčovacího obvodu

Při testování tohoto integrovaného měniče na prototypové DPS nebylo ještě dosaženo stability pro celý rozsah výstupních napětí. Při jeho zatížení, případně změny výstupního napětí docházelo k poškození obvodu, konkrétně k napěťovému průrazu jednoho spínacího tranzistoru, více v kapitole 3.1. Pro tuto situaci byl navržen RC snubber, jehož úkolem je potlačit vysokofrekvenční tlumené oscilace, způsobující napěťové špičky vznikající na spínacích prvcích při jejich rozpínání [15].

RC snubber je tvořen sériovým spojením odporu a kondenzátoru a připojuje se paralelně ke spínacím prvkům, na kterých mají být potlačeny tlumené kmity. Nevýhodou tohoto obvodu je snížení účinnosti obvodu, ve kterém je snubber použit, jelikož se na odporu R mění elektrický výkon v teplo. Ztrátový výkon na tomto odporu se vypočítá dle vztahu 2.5.

Pro jeho návrh bylo potřeba zjistit parazitní indukčnost a kapacitu tvořenou spojem mezi cívkou a tranzistorem. Podrobný postup je uveden v [16]. Po připojení externího kondenzátoru, byla zjištěna nová frekvence tlumených kmitů a na základě této změny byly vypočítány potřebné hodnoty parazitní kapacity a indukčnosti.

V dalším kroku byla vytvořena sada hodnot různých činitelů tlumení, pro které byly vypočítány hodnoty R a C prvku tvořící snubber. Dle vztahu 2.6 byl k jednotlivým hodnotám vypočten ztrátový výkon na odporu R snubberu a vybrán kompromis mezi tímto ztrátovým výkonem a činitelem tlumení [15].

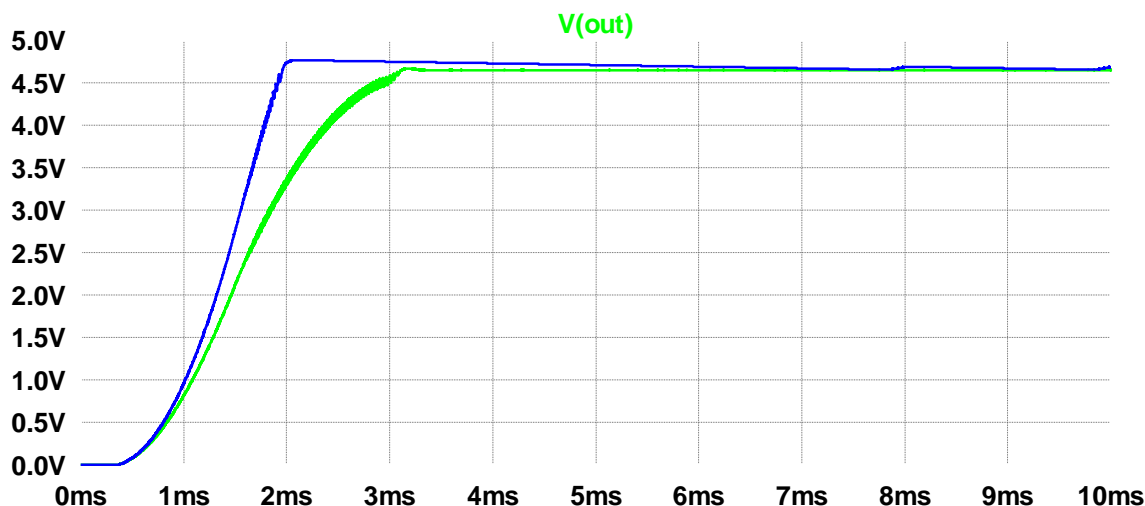
$$P_{R_{\text{snubb}}} = C_{\text{snubb}} \cdot V^2 \cdot f_s, \quad (2.6)$$

Kde C_{snubb} je hodnota kapacity snubberu ve F, V je napětí spínané spínacím prvkem ve V a f_s je spínací frekvence v Hz.

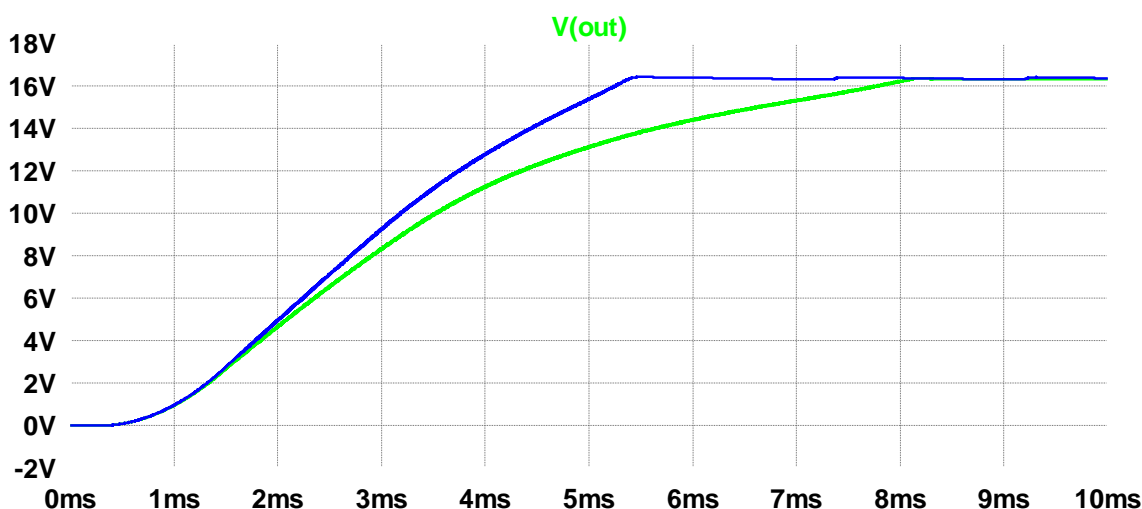
Ve finální verzi zdroje není snubber použit, jelikož byla zajištěna stabilita výstupního měniče a tedy na spínacích prvcích nevznikají tyto tlumené kmity, případně jen s velmi malou amplitudou.

2.1.4 Simulace navrženého obvodu

Funkce navrženého obvodu byla simulována v programu LTspice firmy Linear Technology. Simulována byla funkce regulace výstupního napětí, maximálního výstupního proudu a zatížení měniče různými hodnotami odporu zátěže, pro zvolené výstupní napětí 5 V a 16 V. Výsledky simulace regulace výstupního napětí a maximálního výstupního proudu jsou uvedeny v kapitole 2.3, níže. Výsledky simulace zapojení pro hodnoty odporu zátěže 5 Ω , 40 Ω a 1 k Ω při výstupním napětí přibližně 5 V a 16 V jsou zobrazeny na obrázku 2.8, resp. 2.9, níže.



Obrázek 2.8 Výsledek simulace výstupního napětí pro hodnotu zatěžovacího odporu (zleva) 1 k Ω a 5 Ω , při výstupním napětí přibližně 5V



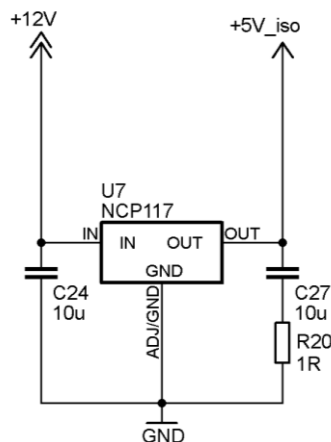
Obrázek 2.9 Výsledek simulace výstupního napětí pro hodnotu zatěžovacího odporu (zleva) 1 k Ω a 40 Ω , při výstupním napětí přibližně 16V

2.2 Napájení řídicí části

Napájení řídicí části je realizováno lineárním stabilizátorem, který je napájen z výstupu izolovaného DC/DC měniče s výstupním napětím 12 V. Schéma zapojení tohoto stabilizátoru je uvedeno na obrázku 2.10, níže.

Použit je lineární stabilizátor NCP1117 firmy ON Semiconductor. Jedná se o klasický tří-svorkový stabilizátor s fixní hodnotou výstupního napětí 5 V. Použito je doporučené katalogové zapojení výrobce vč. doporučených hodnot kapacit vstupního a výstupního kondenzátoru, doplněné o odpor R20 zvyšující ESR výstupního kondenzátoru. Jedná se o kondenzátory s kapacitou 10 μ F a nízkým ESR 20 m Ω . Hodnota ESR výstupního kondenzátoru je určena výrobcem v rozmezí 33 m Ω až 2,2 Ω z důvodu zajištění stability a nízké hodnoty zvlnění výstupního napětí, z tohoto důvodu

byl do zapojení vložen odpor R20 [17].



Obrázek 2.10 Zapojení lineárního stabilizátoru NCP1117

Maximální výkonová ztráta na tomto stabilizátoru je 420 mW, vypočtena dle vztahu 2.7. Stabilizátor bude sloužit k napájení pouze pro mikrokontrolér ATmega328, power monitor INA219, LCD displej a pro tři optoizolátory.

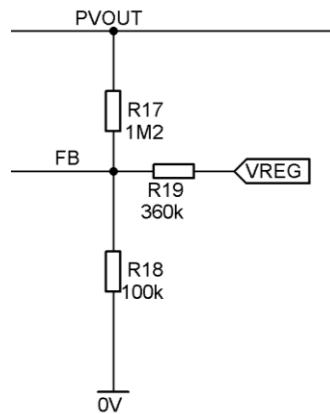
$$P_{ztr} = \frac{U_{vst} - U_{výst}}{I_{výst}}, \quad (2.7)$$

kde U_{vst} je napětí na vstupu stabilizátoru ve V, $U_{výst}$ je napětí na výstupu stabilizátoru ve V a $I_{výst}$ je výstupní proud stabilizátoru v A při zanedbání jeho vlastní spotřeby.

2.3 Regulace napětí a omezení proudu

2.3.1 Regulace napětí

Při regulaci výstupního napětí se vyšlo ze základního zapojení s odporovým snímacím děličem napětí na výstupu zdroje. Oproti klasickému zapojení, kde se však výstupní napětí řídí změnou poměru tohoto děliče (resp. odporu R18) je v tomto případě, pro umožnění digitálního řízení, připojeno předpětí na pin FeedBack, což je vstup chybového zesilovače. Zapojení tohoto děliče je uvedeno na obrázku 2.11, níže.



Obrázek 2.11 Zapojení zpětnovazebního děliče napětí, [18]

Děličem tvořeným rezistory R18 a R17 je ve vhodném poměru sníženo výstupní napětí a toto napětí je přivedeno na FeedBack pin regulátoru. Rozdílem tohoto napětí a vnitřního referenčního napětí 1 V, je ovlivňována střída spínání vnitřních tranzistorů. Pomocí děliče tvořeného rezistory R19 a R18 je na FeedBack pin přiváděno předpětí, které je úměrné regulačnímu napětí, jež je přiváděno z mikrokontroléru. Tímto předpětím prakticky dochází k regulaci výstupního napětí, jehož hodnota je nastavována dle vztahu

$$U_{OUT} = k_1 - k_2 \cdot U_{REG}, \quad (2.8)$$

kde U_{OUT} je velikost výstupního napětí měniče ve V, k_1 a k_2 jsou převodní konstanty a U_{REG} velikost regulačního napětí ve V.

Převodní konstanty jsou určeny hodnotami odporů rezistorů, tvořících zpětnovazební dělič a lze je vypočítat dle vztahu 2.9, resp. 2.10

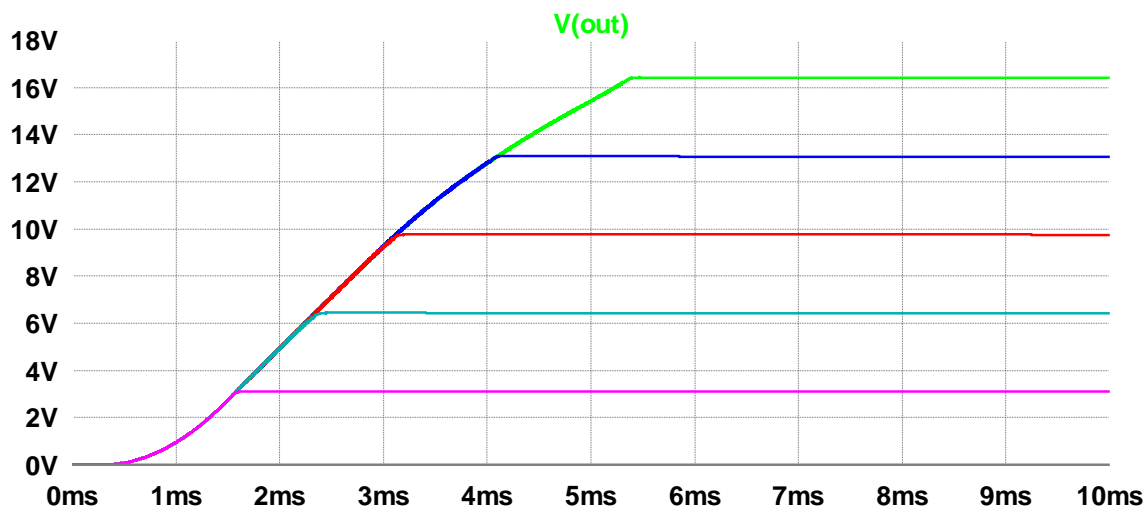
$$k_1 = \frac{R_{18} || R_{17}}{R_{18} || R_{17} + R_{19}}, \quad (2.9)$$

$$k_2 = \frac{R_{18} || R_{19}}{R_{19} || R_{15} + R_{17}}, \quad (2.10)$$

kde R_{19} , R_{18} a R_{17} jsou hodnoty rezistorů tvořící zpětnovazební dělič v Ω .

Vzhledem k tolerancím použitých součástek, a také z důvodu použití nejbližších hodnot z řad pro vypočtené součástky, byla změřena skutečná závislost výstupního napětí na napětí regulačním a proveden přepočten konstant.

Výsledek simulace regulace výstupního napětí, provedené v programu LTspice, je zobrazen na obrázku 2.12. Vzhledem k velké časové náročnosti simulování obvodu s tímto modelem součástky je zobrazeno pouze prvních 10ms, i přesto je výsledek simulace zřejmý.



Obrázek 2.12 Výsledek simulace regulace výstupního napětí

Následující tabulka 2.2 zobrazuje vypočtené, simulované a změřené hodnoty výstupního napětí pro různá regulační napětí. Pořadí křivek v obrázku (shora) odpovídá pořadí hodnot v tabulce (shora).

Tabulka 2.2 Závislost velikosti výstupního napětí na velikosti regulačního napětí

| U_{REG} [V] | U_{OUT} [V] | | |
|----------------------|----------------------|----------|--------|
| | Výpočet | Simulace | Měření |
| 0 | 16,333 | 16,398 | 16,383 |
| 1 | 13,000 | 13,053 | 13,061 |
| 2 | 9,667 | 9,756 | 9,739 |
| 3 | 6,333 | 6,423 | 6,417 |
| 4 | 3,000 | 3,092 | 3,095 |
| 5 | -0,333 | 0,002 | -0,003 |

2.3.2 Omezení proudu

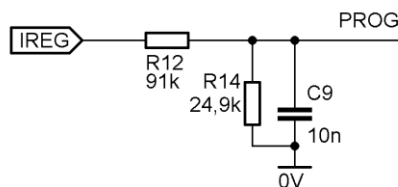
Spínaný regulátor LTC3114-1 disponuje obvodem pro nastavení maximálního výstupního proudu, které se provádí zapojením rezistoru o vhodné hodnotě mezi pin PROG a GND. Jeho hodnota se vypočítá, při požadovaném maximálním výstupním proudu dle vztahu 2.11 v [12]

$$I_{\text{OUT(AVG)}} \cong 25000 \cdot \frac{1}{R_{14}}, \quad (2.11)$$

kde $I_{\text{OUT(AVG)}}$ je maximální střední hodnota výstupního proudu regulátoru v A a R_{14} hodnota odporu R_{14} v Ω .

K pinu PROG je zapojen výstup vnitřního proudového snímače se ziskem 40 $\mu\text{A/A}$, jež snímá výstupní proud pinu PV_{OUT} . Průchod proudu ze snímače způsobuje na připojeném rezistoru R_{14} úbytek napětí, který je vnitřním zesilovačem odečítán od

referenčního napětí, výstup z tohoto zesilovače ovlivňuje třídu spínání vnitřních tranzistorů. Zapojení tohoto obvodu je na obrázku 2.13, níže.



Obrázek 2.13 Zapojení děliče pro regulaci maximálního výstupního proudu

Paralelně k tomuto rezistoru R14 se připojuje kondenzátor C9, který zajišťuje vytvoření střední hodnoty napětí. Jeho hodnota je zvolena dle doporučené hodnoty uvedené v [12]. Základní zapojení je doplněno o rezistor R12, který společně s rezistorem R14 tvoří odporový dělič, pomocí kterého je na pin PROG přiváděno předpětí sloužící k nastavení maximálního výstupního proudu regulátoru. Maximální hodnota výstupního proudu v závislosti na regulačním napětí se vypočítá dle vztahu 2.12, níže,

$$I_{OUT(AVG)} = \frac{0,925 - U_{REG} \cdot K_3}{K_4}, \quad (2.12)$$

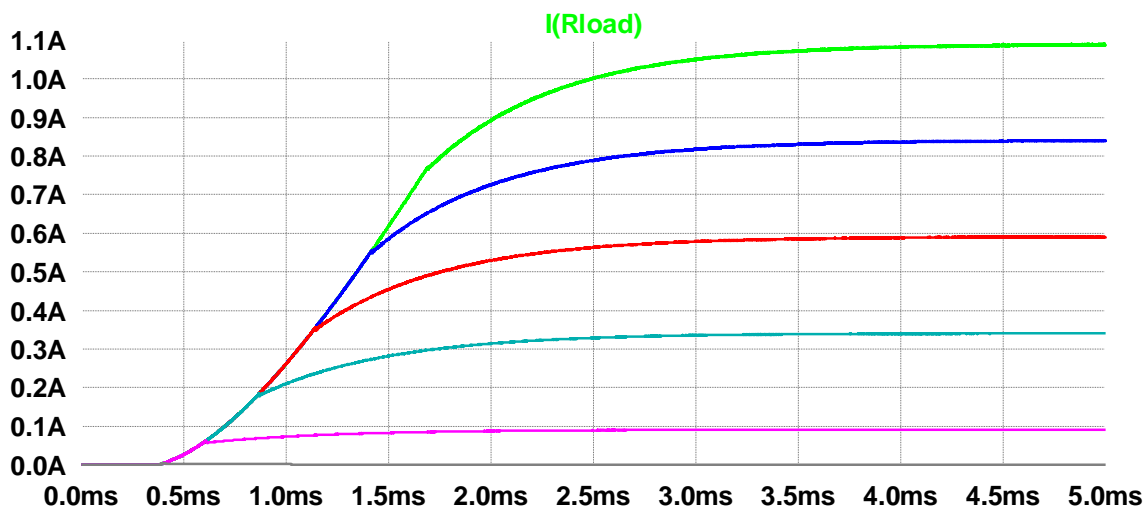
kde $I_{OUT(AVG)}$ je maximální střední hodnota výstupního proudu regulátoru v A, U_{REG} velikost regulačního napětí připojeného na pin IREG ve V, K_3 a K_4 jsou převodní konstanty (K_4 v Ω), jež jsou určeny hodnotami rezistorů R14 a R12.

$$K_3 = \frac{R_{14}}{R_{14} + R_{12}}, \quad (2.13)$$

$$K_4 = \frac{R_{14} || R_{12}}{25000}, \quad (2.14)$$

kde R14 a R12 jsou hodnoty rezistorů děliče napětí v Ω .

Výsledek simulace regulace maximálního výstupního proudu je zobrazen na obrázku 2.14.



Obrázek 2.14 Výsledek simulace regulace maximálního výstupního proudu

Následující tabulka 2.3 zobrazuje vypočtené, simulované a změřené hodnoty maximálního výstupního proudu pro různá regulační napětí. Pořadí křivek v obrázku (shora) odpovídá pořadí hodnot v tabulce (shora).

Tabulka 2.3 Závislost velikosti maximálního výstupního proudu na velikosti regulačního napětí

| U_{IREG} [V] | I_{OUTmax} [A] | | |
|-----------------------|-------------------------|----------|--------|
| | Výpočet | Simulace | Měření |
| 0 | 1,183 | 1,089 | - |
| 1 | 0,908 | 0,843 | - |
| 2 | 0,633 | 0,591 | 0,518 |
| 3 | 0,359 | 0,340 | 0,392 |
| 4 | 0,084 | 0,091 | - |
| 5 | -0,190 | 0,000 | - |

Jako nedostatek tohoto způsobu proudového omezení lze shledat jeho minimální hodnotu, která nevede k ovlivnění výstupního napětí při jeho nastavení. Při nastavení hodnoty maximálního proudu pod hodnotu přibližně 350 mA dojde totiž k ovlivnění hodnoty výstupního napětí, konkrétně k jejímu snížení v řádu desítek milivoltů. Proto je nutné, při potřebě nastavení maximálního výstupního proudu nižšího než 350 mA, po jeho nastavení následně výstupní napětí dostavit. Dále bylo měřením zjištěno, že při tomto způsobu regulace je zdroj schopen omezovat proud až od hodnoty přibližně 200 mA.

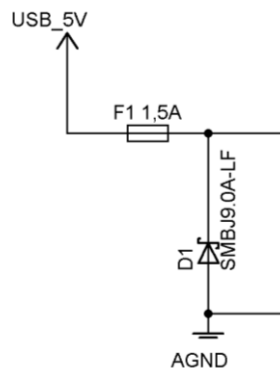
Při aktivaci proudové limitace dochází ke kmitání výstupního napětí, čímž dochází ke kmitání výstupního proudu. Mezi vrcholová hodnota těchto kmitů je přibližně 2,8 mA pro největší hodnotu maximálního výstupního proudu.

2.4 Vstupní ochrany

Celé zařízení obsahuje celkem čtyři druhy vstupních ochran, jejichž primárním účelem je zajištění jeho bezpečného odpojení a oddělení od USB portu, jež bude poskytovat napájení a zároveň bude použit pro komunikaci mikrokontroléru s počítačem, při nežádoucím stavu.

2.4.1 Přepět'ová ochrana

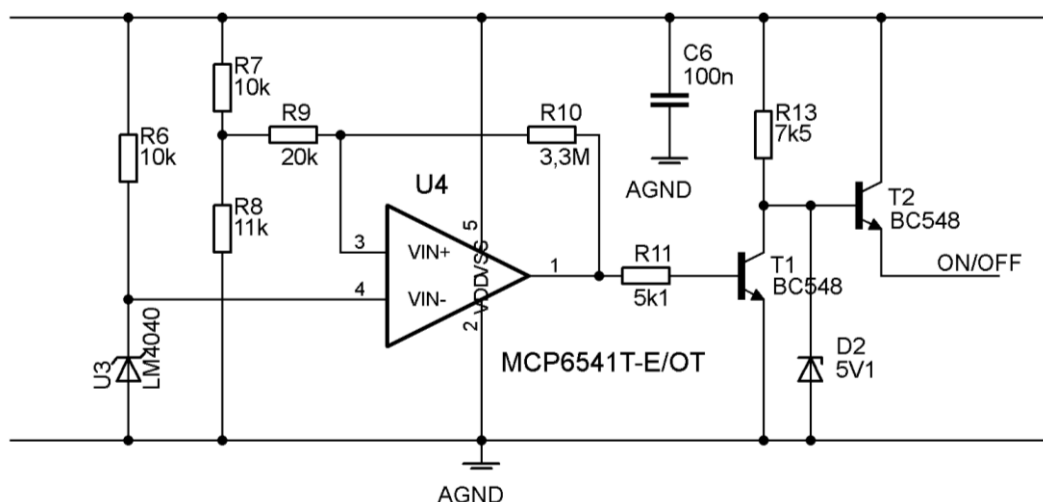
Prvním typem vstupní ochrany je ochrana proti přepětí na vstupní straně zařízení, jehož schematické zapojení je uvedeno na obrázku 2.15, níže. Tato ochrana je zajištěna kombinací jednosměrného transilu a vratné pojistky (Polyswitch). Princip této ochrany je založen na principu funkce transilu, který, při překročení hodnoty prahového napětí, prudce sníží svůj odpor. Tímto snížením odporu dojde průtoku velkého proudu vratnou pojistkou z napájecího zdroje. Jakmile hodnota tohoto proudu vzroste nad jmenovitý proud pojistky, zareaguje značným zvýšením svého odporu. Tím dojde k odpojení vstupního napětí od izolovaného DC/DC měniče a také k reakci podpět'ové ochrany, která tento měnič vypne.



Obrázek 2.15 Zapojení obvodu přepět'ové ochrany

2.4.2 Podpět'ová ochrana

Druhým typem vstupní ochrany je ochrana proti podpětí na vstupní straně zařízení, jehož schematické zapojení je uvedeno na obrázku 2.16, níže. Tato ochrana je zajištěna zapojením komparátoru v neinvertujícím režimu s hysterezí, jež porovnává referenční napětí s vyděleným vstupním napětím. Při překročení požadované minimální hodnoty vstupního napětí dojde ke spuštění izolovaného DC/DC měniče.



Obrázek 2.16 Zapojení obvodu podpět'ové ochrany

Použit je komparátor MCP6541 firmy Microchip technology, který je schopen pracovat s nesymetrickým napájecím napětím v rozmezí od 1,6 V do 5,5 V. Rychlost reakce komparátoru je 4 μ s, což zajišťuje rychlou aktivaci podpět'ové ochrany, ještě před spuštěním izolovaného DC/DC měniče. Výstup tohoto komparátoru je typu push-pull, není tedy nutné používat pull-up rezistory. Zapojení komparátoru bylo převzato z datasheetu [19], jako doporučené zapojení neinvertujícího komparátoru s hystezí. Rezistory zajišťující tuto hysterezi byly vypočítány dle vztahu 2.15, resp. 2.16, uvedených výrobcem

$$U_{TLH} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_9}{R_{10}}\right) - U_{OL} \cdot \frac{R_9}{R_{10}}, \quad (2.15)$$

kde U_{TLH} je úroveň překlápěcího napětí při přechodu z nízké do vysoké úrovně ve V, U_{REF} velikost referenčního napětí ve V, U_{OL} velikost výstupního napětí při nízké logické úrovni ve V a R_2 a R_3 hodnoty rezistorů nastavující hysterezi komparátoru v Ω .

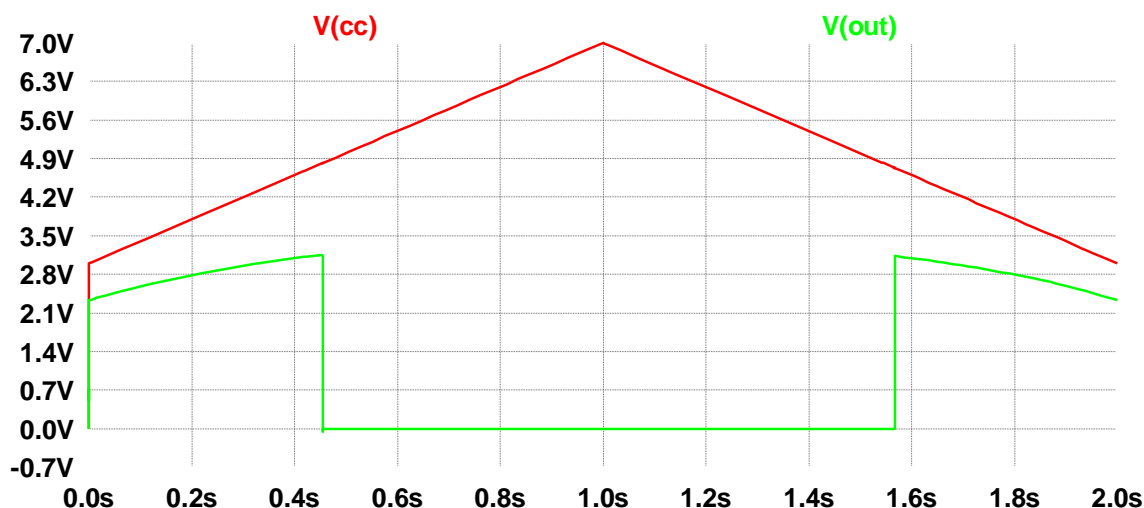
$$U_{THL} = U_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R_9}{R_{10}}\right) - U_{OH} \cdot \frac{R_9}{R_{10}}, \quad (2.16)$$

kde U_{THL} je úroveň překlápěcího napětí při přechodu z vysoké do nízké úrovně ve V, U_{OH} je velikost výstupního napětí při vysoké logické úrovni ve V.

Jako zdroj referenčního napětí je použita napět'ová reference LM4040 [20]. Hystereze komparátoru zabraňuje kmitání výstupu komparátoru, při jeho překlápění, resp. při stejné nebo blízké hodnotě velikosti porovnávaného napětí, s napětím referenčním a jeho hodnota je nastavena na přibližně 100 mV. Na obrázku 2.17 je zobrazen simulovaný průběh napájecího napětí V(cc) a průběh napětí řídicího izolovaný měnič V(out). Tabulka 2.4 obsahuje vypočtené, simulované a měřené napět'ové úrovně podpět'ové ochrany.

Tabulka 2.4 Napět'ové úrovně podpět'ové ochrany

| – | Výpočet | Simulace | Měření |
|----------------|---------|----------|--------|
| UTLH [V] | 4,733 | 4,718 | 4,755 |
| UTHL [V] | 4,829 | 4,818 | 4,846 |
| Hystereze [mV] | 96 | 100 | 91 |



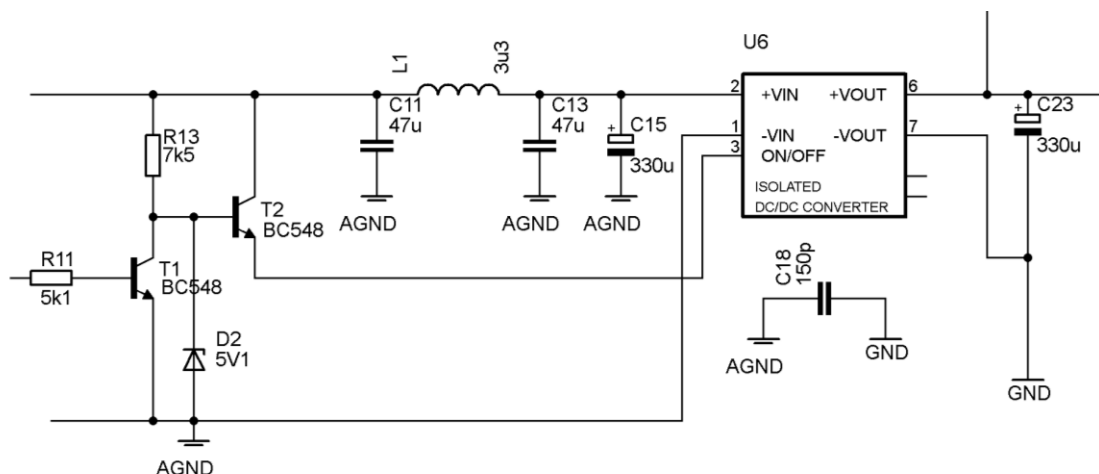
Obrázek 2.17 Simulovaný průběh napájecího a řídicího napětí pro izolovaný měnič

2.4.3 Galvanická izolace napájení

Oddělení napájecích vodičů je realizováno modulovým izolovaným DC/DC měničem TMR 06-0512 firmy Traco Power z řady TMR6. Tato řada měničů o výkonu 6 W je vybavena výstupní ochrannou proti zkratu s automatickým obnovením funkce a externím vstupem pro možnost zapnutí a vypnutí. Dále se vyznačuje vysokou účinností (až 86 %) a malými rozměry s plochou kolem 2 cm².

Nominální vstupní napětí použitého měniče je 5 V DC, výrobcem udávaný rozsah vstupních napětí je však rozmezí 4,5 V až 9 V DC. Výstupní napětí měniče je 12 V a při výstupním výkonu 6 W, činí jeho maximální výstupní proud 500 mA. Deklarovaná účinnost tohoto měniče je 84 % [21].

Řízení stavu (zapnuto/vypnuto) tohoto měniče probíhá pinem ON/OFF, hodnotami napětí v rozmezí 4,5 V až 9 V. Při napětí, z uvedeného rozsahu, na tento pin dojde k vypnutí měniče. Opětovné spuštění se provede odpojením napětí z řídicího pinu (stav vysoké impedance nebo rozpojení). Doporučené zapojení s udanými hodnotami součástek pro vstupní napětí v rozsahu 4,5 V až 9 V bylo převzato z datasheetu [22] a z příložených aplikačních souborů použitého měniče a je uvedeno na obrázku 2.18, níže [21].



Obrázek 2.18 Zapojení izolovaného DC/DC měniče s řídicím obvodem

Uvedené zapojení pracuje s TTL signály s pozitivní logikou, což zajišťuje zapnutí měniče při úrovni logické jedničky na výstupu komparátoru a vypnutí měniče při úrovni logické nuly.

2.4.4 Galvanická izolace datových vodičů

Pro optické oddělení datových vodičů sériového rozhraní obvodu FT232R a MCU ATmega328 byly použity optočleny PC3H7J00000F firmy Sharp. Jedná o klasické diodové optočleny s tranzistorovým výstupem. Zapojení těchto optočlenů je uvedeno na obrázku 2.19, níže. Hodnoty předřadných rezistorů pro vnitřní LED diody a pull-up rezistorů pro výstupní tranzistory jsou vypočítány dle vztahu 2.17, za pomoci parametrů a grafů uvedených v datasheetu použitých optočlenů. Proud LED diodami je zvolen tak, aby nedošlo k překročení maximálního možného proudu procházejícího piny mikrokontroléru a převodníku FT232R, který je 6mA. Proud procházející výstupními rezistory v sepnutém stavu je zvolen dle poměrného přenosu proudu CTR při zvoleném proudu LED diodou 5mA. Zároveň byla jeho hodnota ovlivněna dobou zpoždění při průchodu digitálního signálu a dobami trvání nástupných a sestupných hran, ze závislosti času odezvy na odporu zátěže, uvedené v datasheetu [23], vyplývá, že čím větší je velikost odporu rezistoru R30, resp. R28, tím větší je doba nástupné a sestupné hrany na výstupu optočlenu.

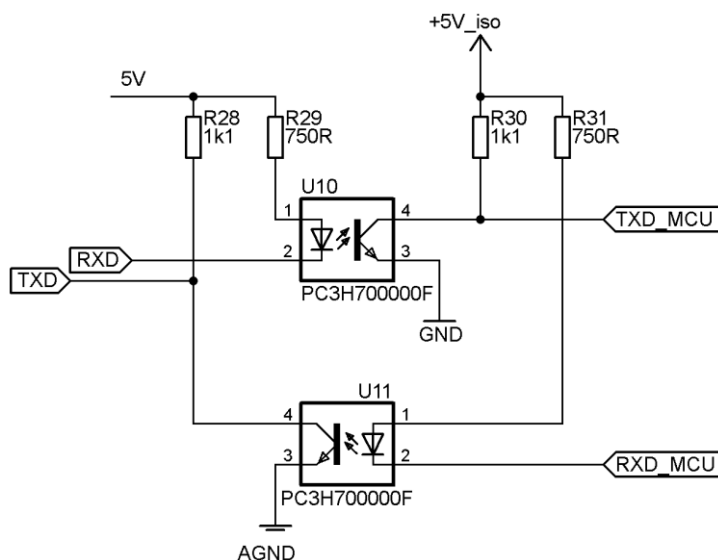
$$R_{29} = \frac{U_{\text{USB}_5\text{V}} - U_{\text{LED}}}{I_{\text{LED}}}, \quad (2.17)$$

kde $U_{\text{USB}_5\text{V}}$ je nominální napětí USB sběrnice ve V, U_{LED} je úbytek napětí na LED diodě optočlenu při zvoleném proudu ve V a I_{LED} je proud procházející touto diodou v A.

Maximální bitová rychlost datového signálu přenášeného těmito optočleny je přibližně 200 kb/s. Tato rychlost byla vypočtena na základě zpoždění signálu při průchodu optočlenem, dle vztahu 2.18, uvedeném v [24],

$$R = \frac{1}{t_{\text{DELAY}}}, \quad (2.18)$$

kde t_{DELAY} je velikost zpoždění signálu při průchodu optočlenem v s.

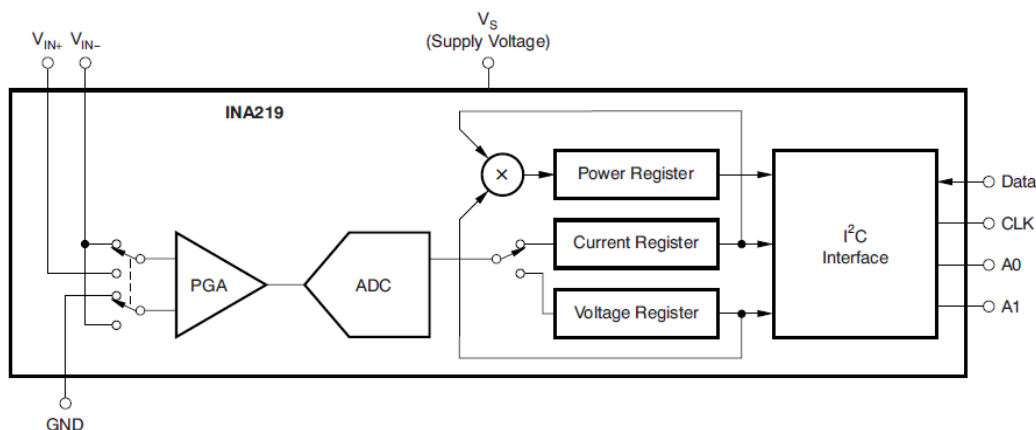


Obrázek 2.19 Zapojení optočlenů pro galvanickou izolaci sériového rozhraní

2.5 Měření napětí a proudu

Měření napětí a proudu je realizováno speciálním obvodem pro měření jak napětí, tak proudu (digital power monitor). Jedná se o obvod INA219 firmy Texas Instruments, který umožňuje, s připojením několika externích součástek, měřit jak napětí (voltage monitor), tak proud (current shunt) a z těchto hodnot je schopen vypočítávat výkon. Informace o velikosti měřených hodnot jsou odesílány přes integrovanou sběrnici I2C do MCU případně do jiného obvodu s touto sběrnici komunikujícího. Na obrázku 2.20 je zobrazeno vnitřní blokové zapojení tohoto power monitoru.

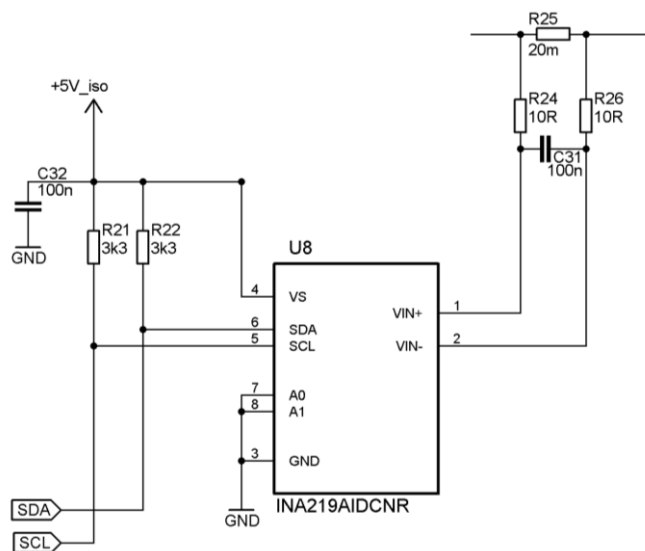
Tento obvod byl vybrán na základě jeho digitálního I2C výstupu a jeho schopnosti měřit proud a napětí s dostatečným rozlišením, možností měnit rozsah měření napětí a také automatické výpočtu výkonu na základě měřených hodnot.



Obrázek 2.20 Vnitřní blokové zapojení power monitoru INA219. Převzato z [25]

Měření proudu je realizováno měřením úbytku napětí na snímacím rezistoru o velmi malé hodnotě při průchodu měřeného proudu. Tento úbytek je zesilován vnitřním integrovaným diferenčním zesilovačem s nastavitelným ziskem. Nastavitelný zisk tak zvyšuje přesnost měření, především při měření velmi malých hodnot proudu, kdy není možné mít nastaven zisk příliš velký, jelikož při měření velkých hodnot proudu by došlo k zvýšení výstupního napětí nad hodnotu referenčního napětí AD převodníku. V tomto případě je ale využita pouze jedna hodnota zisku, a to hodnota 1.

Měření napětí je realizováno stejnou částí obvodu, jaká je použita pro měření proudu. Rozdíl je pouze v tom, že měřené napětí diferenčním zesilovačem není měřeno na snímacím rezistoru, ale přímo mezi zemí a výstupem zdroje za snímacím rezistorem, viz zapojení obvodu na obrázku 2.21.



Obrázek 2.21 Zapojení power monitoru INA219

Hodnoty součástek byly zvoleny dle doporučených hodnot výrobce uvedených v [25]. Vypočtena byla hodnota snímacího rezistoru R_{SENSE} , na základě minimální rozlišení vnitřního AD převodníku, při jednotkovém zisku vnitřního diferenčního

zesilovače, které je 10 μV a maximální rozsah 40 mV, dle vztahu 2.19. Aby bylo možné měřit proud 1 A, vychází hodnota snímacího rezistoru, při uvedeném rozsahu, 40 m Ω . Vzhledem tomu, že by tato hodnota nepříznivě ovlivnila vnitřní odpor zdroje, byla zvolena hodnota poloviční, tedy 20 m Ω .

$$R_{\text{SENSE}} = \frac{U_{\text{rozsah}}}{I_{\text{max}}}, \quad (2.19)$$

kde R_{SENSE} je hodnota odporu snímacího rezistoru v Ω , U_{rozsah} měřicí rozsah A/D převodníku při jednotkovém zisku diferenčního zesilovače ve V a I_{max} maximální měřený proud tekoucí snímacím rezistorem v A [26].

Funkce měření proudu a následného výpočtu výkonu jsou k dispozici pouze tehdy, pokud je naprogramován vnitřní kalibrační registr, do kterého je třeba zapsat hodnoty potřebné pro správné vyjádření výsledku měření v digitální podobě a pro správný následný přepočítání na reálnou hodnotu. Tento výpočet lze provést ručně postupem udaným v [25] nebo využít speciálního softwaru, který poskytuje výrobce na svých webových stránkách. Využití tohoto softwaru je také popsáno v datasheetu obvodu.

Pro převod digitální hodnoty poskytnuté power monitorem na hodnotu skutečnou, je třeba příslušnou dekadickou hodnotu vynásobit konstantou LSB, která je pro měření proudu a výkonu různá, v závislosti na výpočtu kalibračního registru. Pro měření napětí je tato hodnota závislá na měřicím rozsahu.

2.6 Mikrokontrolér ATmega328

Hlavní řídicí jednotkou zdroje je mikrokontrolér ATmega328 rodiny AVR od firmy Atmel, zajišťující řízení zdroje a komunikaci s počítačem a dalšími periferiemi.

2.6.1 Komunikace s periferiemi

Měření velikosti výstupního napětí a proudu obstarává power monitor INA219, blíže popsáný v kapitole 2.5. S mikrokontrolérem komunikuje přes rozhraní I2C. Firma Atmel v některých svých mikrokontrolérech používá rozhraní TWI (Two Wire interface), které je naprosto totožné s rozhraním I2C, jde pouze o jiný název. Pro komunikaci přes toto rozhraní slouží piny PC4 (SDA) a PC5 (SCL).

Další měření je prováděno pomocí integrovaného A/D převodníku, který slouží k měření velikosti výstupního napětí izolovaného DC/DC měniče, což je informace pro mikrokontrolér, který následně vyhodnotí, zda má povolit zapnutí výstupního měniče.

Dále je k příslušným pinům mikrokontroléru připojen konektor, jenž slouží k připojení sériového programátoru s možností programování přímo v aplikaci a také k propojení mikrokontroléru s tlačítky. Konkrétní zapojení pinů konektoru odpovídá programátoru Atmel ICE firmy Atmel.

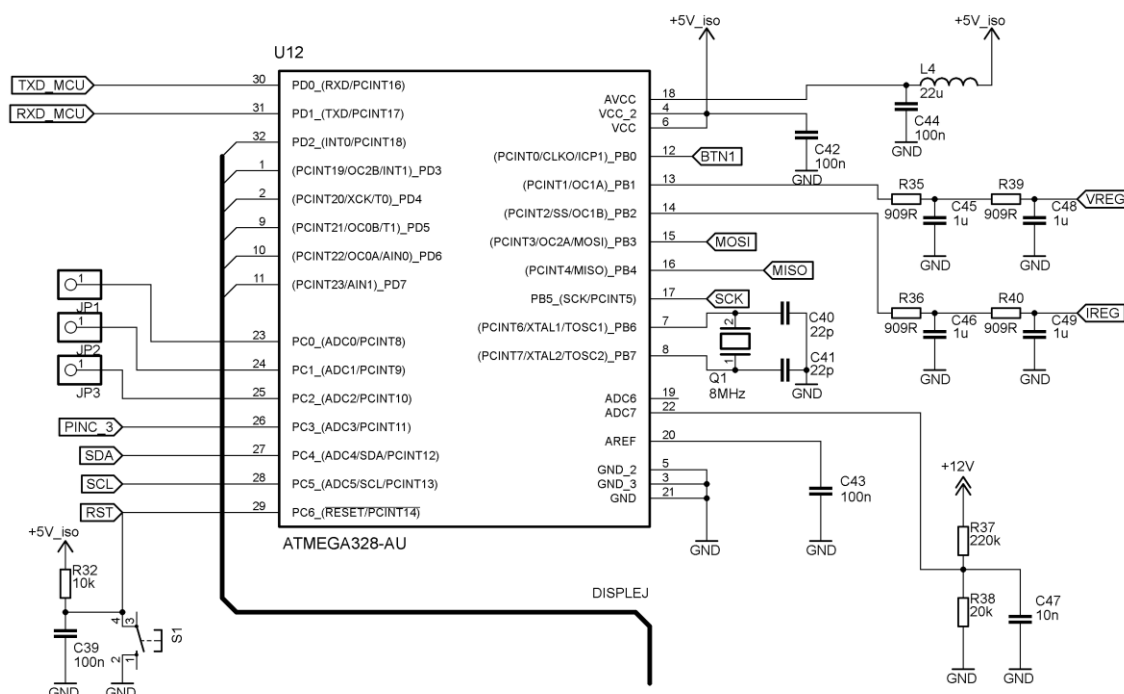
Komunikace s počítačem probíhá z pohledu mikrokontroléru přes sériový port s piny PD0 (RxD) a PD1 (TxD). Ty jsou přes optočleny spojeny s převodníkem FT232R, blíže popsáný v kapitole 2.7.

2.6.2 Komunikace s uživatelem

K ovládání zdroje slouží čtyři tlačítka, připojena na port B. Tlačítka budou sloužit k nastavení velikosti výstupního napětí a proudu, vypnutí zdroje a případně k dalším možným funkcím.

Pro zobrazení základních údajů zdroje, jako je velikost výstupního napětí, proudu a stavu výstupního měniče (zapnuto/vypnuto) slouží dvouřádkový LCD displej DEM 16209 SBH-PW-N výrobce Display Elektronik s řadičem NT7603H-BDT01, komunikující s mikrokontrolérem ve 4 bitovém módu, z důvodu ušetření volných pinů mikrokontroléru.

Další prvky jsou zapojeny dle požadavků výrobce s typickými hodnotami používanými v různých aplikacích. Zapojení mikrokontroléru a jeho periférií je zobrazeno na obrázku 2.22, níže.



Obrázek 2.22 Zapojení mikrokontroléru ATmega328 s periferiemi

2.6.3 Návrh filtru

Řízení velikosti výstupního napětí a maximální velikosti výstupního proudu je realizováno pomocí řídicího napětí, způsobem popsaným v kapitole 2.3.1, resp. 2.3.2. V obou případech je využito PWM výstupu mikrokontroléru, na který je připojen RC filtrační člen zajišťující na svém výstupu střední hodnotu napětí úměrnou střídě PWM signálu.

Frekvence generovaného PWM signálu je dána vztahem 2.20, přičemž maximální frekvence je rovna polovině frekvence krystalového oscilátoru [27].

$$f_{\text{OCnxPWM}} = \frac{f_{\text{clk_I/O}}}{N \cdot (1 + TOP)}, \quad (2.20)$$

kde $f_{\text{clk_I/O}}$ je frekvence krystalového oscilátoru v Hz, N hodnota předděličky, TOP je vrcholová hodnota registru OCR1X, při které dojde k vynulování čítače.

Při volbě frekvence PWM signálu je třeba sledovat také rozlišení, tedy hodnotu která udává nejmenší změnu střidy. Rozlišení je tím větší, čím menší je požadovaná frekvence PWM signálu. Je tedy nutné zvolit vhodný kompromis. Rozlišení se přibližně určí dle vztahu 2.21 [27].

$$R_{\text{FPWM}} = \frac{\log(TOP + 1)}{\log 2}, \quad (2.21)$$

Kde TOP je vrcholová hodnota registru OCR1X.

V případě řídicího napětí, pro řízení výstupního napětí měniče, bylo nutné zajistit dostatečné rozlišení PWM signálu tak, aby bylo možné měnit výstupní napětí s krokem minimálně 0,1 V. Tomuto požadavku odpovídá rozlišení 10 bitů a frekvence 8kHz, vypočteno na základě vztahů v kapitole 2.3.1 a 2.6.

Pro filtraci PWM signálu je použit pasivní RC filtr druhého řádu, jelikož se na základě výsledků měření prototypu ukázalo, že navržený filtr prvního řádu nedostatečně potlačuje zvlnění, které následně ovlivňovalo výstupní napětí.

Hodnoty jeho součástek byly vypočteny na základě doby odezvy zdroje na skokovou změnu regulačního napětí, která je přibližně 6 ms (ověřeno simulací), mezní frekvence a maximálního zvlnění na výstupu filtru, dle vztahu 2.22, 2.23 a 2.24 [28].

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_C}, \quad (2.22)$$

kde τ je časová konstanta filtru v s a f_C je mezní frekvence filtru.

Vztah pro přepočet mezní frekvence filtru n -tého řádu

$$f_{(-3\text{dB})} = f_C \cdot \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}, \quad (2.23)$$

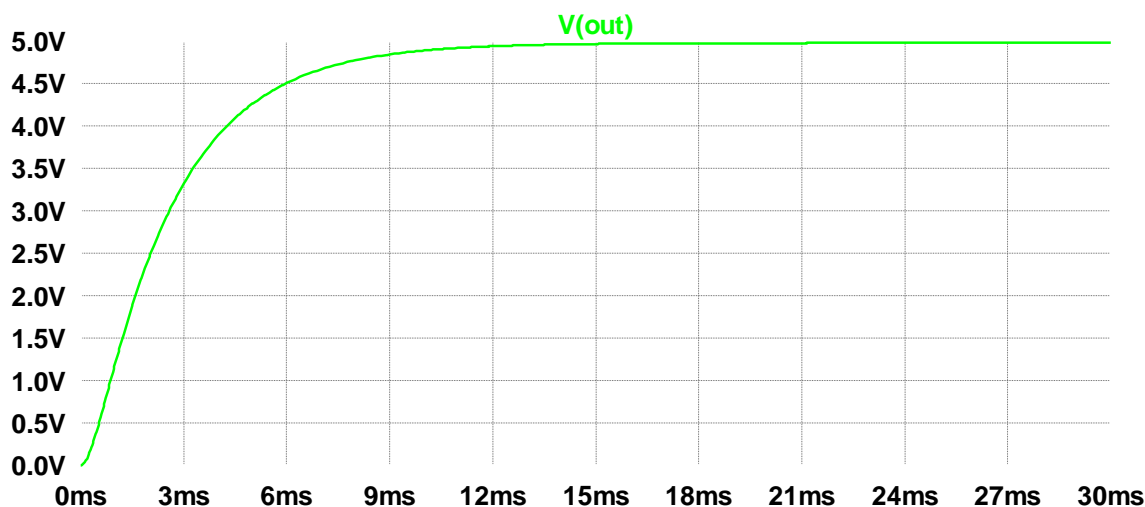
kde f_C je původní mezní frekvence filtru.

$$f_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}, \quad (2.24)$$

kde R je hodnota odporu filtru v Ω a C hodnota kondenzátoru ve F.

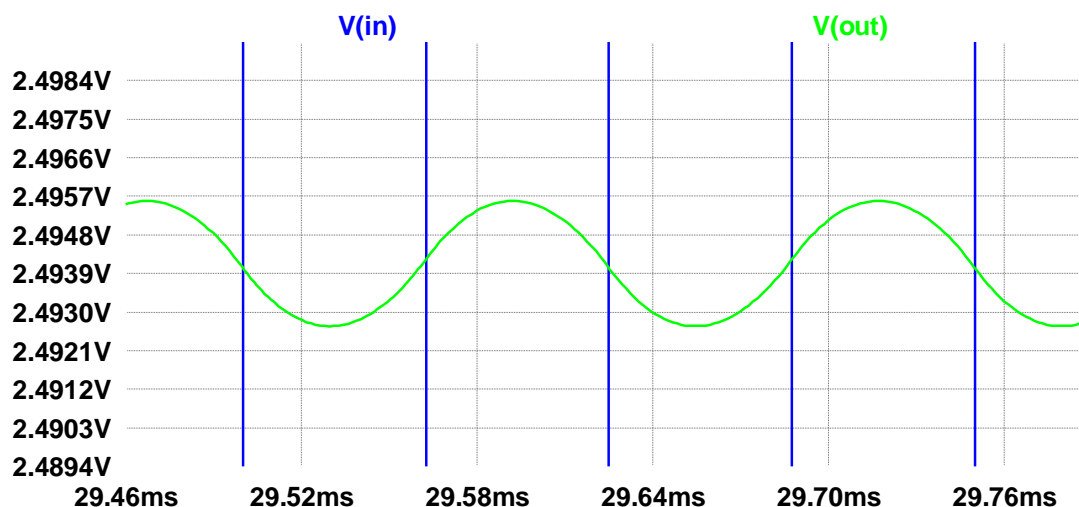
Funkce navrženého filtru byla ověřena v simulačním programu LTspice a také

praktickou realizací. Na obrázku 2.23 je zobrazen průběh vstupního PWM signálu a výstupního filtrovaného signálu při střídě 99 %.



Obrázek 2.23 Časový průběh filtrovaného PWM signálu při střídě 99% a frekvenci 8kHz

Na obrázku 2.24 je zobrazen detail zvlnění filtrovaného signálu při střídě 50 %, dosahující hodnoty 2,915 mV, při které zvlnění dosahuje nejvyšší hodnoty [29].



Obrázek 2.24 Zvlnění filtrovaného signálu při střídě 50% a frekvenci 8kHz

2.7 Převod USB/UART

Celé zařízení komunikuje přes počítač pomocí rozhraní USB. Pro snadné propojení počítače s MCU Atmega328 je využit převodník FT232R firmy FTDI, což znamená, že z pohledu MCU a počítače probíhá komunikace přes sériové rozhraní. Schéma zapojení komunikační části MCU-převodník-počítač je na obrázku 2.25. níže. Zapojení převodníku USB/UART vychází z doporučeného katalogového zapojení samotného převodníku. Rozhraní je propojeno s patřičným rozhraním (TxD, RxD) MCU

ATmega328. Mezi obvod převodníku a MCU je vřazen obvod PC3H7J00000F optoizolace, detailněji popsany v kapitole 2.4.4, výše. Ten zajišťuje galvanické oddělení počítače pro případ vysokého napětí na datových vodičích v případě poruchy zdroje či jakékoliv jiné poruchy. Základní parametry použitého převodníku FT232R jsou shrnuty v tabulce 2.5, níže [30].

Tento obvod byl vybrán na základě požadavku komunikace mikrokontroléru se sériovým portem, jelikož použitý mikrokontrolér obsahuje jednotku UART a komunikace přes tuto jednotku je jednoduchá a je snazší než implementace USB rozhraní.

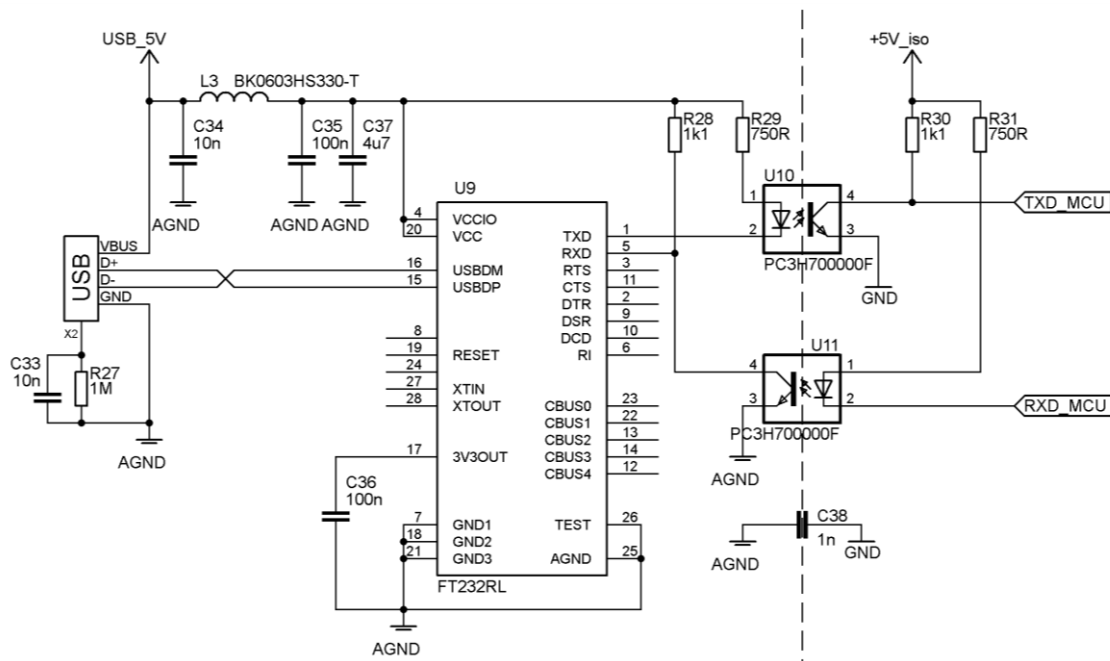
Tabulka 2.5 Základní parametry převodníku FT232R

| Parametr | Hodnota | Poznámka |
|-----------------------------------|-------------------|------------------------------------|
| Napájecí napětí | 4,0 – 5,25V | Při použití interního oscilátoru |
| Napájecí napětí | 3,3 – 5,25V | Při použití externího oscilátoru |
| Proudový odběr | 15mA | Při normálním stavu |
| Datová rychlost | 300 – 3M baudů | RS422 / RS485 při TTL úrovních |
| Datová rychlost | 300 – 1M baudů | RS232 |
| Interní hodinový signál | 6, 12, 24 a 48MHz | Lze vyvést pro MCU nebo jiný obvod |
| Interní EEPROM | 1024B | – |
| Integrované USB pull-up rezistory | – | – |

Tento obvod má integrovanou paměť RAM, v níž jsou uložena data sloužící k nastavení převodníku samotného, nastavení komunikace, funkce pinů CBUS a podobně. Před uvedením do provozu není třeba ji nijak programovat. Pokud ovšem je třeba nastavit funkci CBUS pinů, případně nastavit identifikaci apod., je třeba ji naprogramovat. To se provádí pomocí softwaru MProg výrobce FTDI a připojení obvodu k počítači přes USB.

V tomto případě bylo naprogramováno sériové číslo obvodu pro identifikaci, vygenerované přímo softwarem MProg a nastavení vysoké úrovně proudové úrovně pinů z důvodu vyššího proudu LED diodou optočlenu.

LC filtr tvořený prvky C34, C35, C37 a L3 slouží k zabránění přenosu VF rušení po napájení USB a jeho hodnoty jsou převzaty z aplikační poznámky výrobce [31].



Obrázek 2.25 Zapojení převodníku FT232R s optočleny

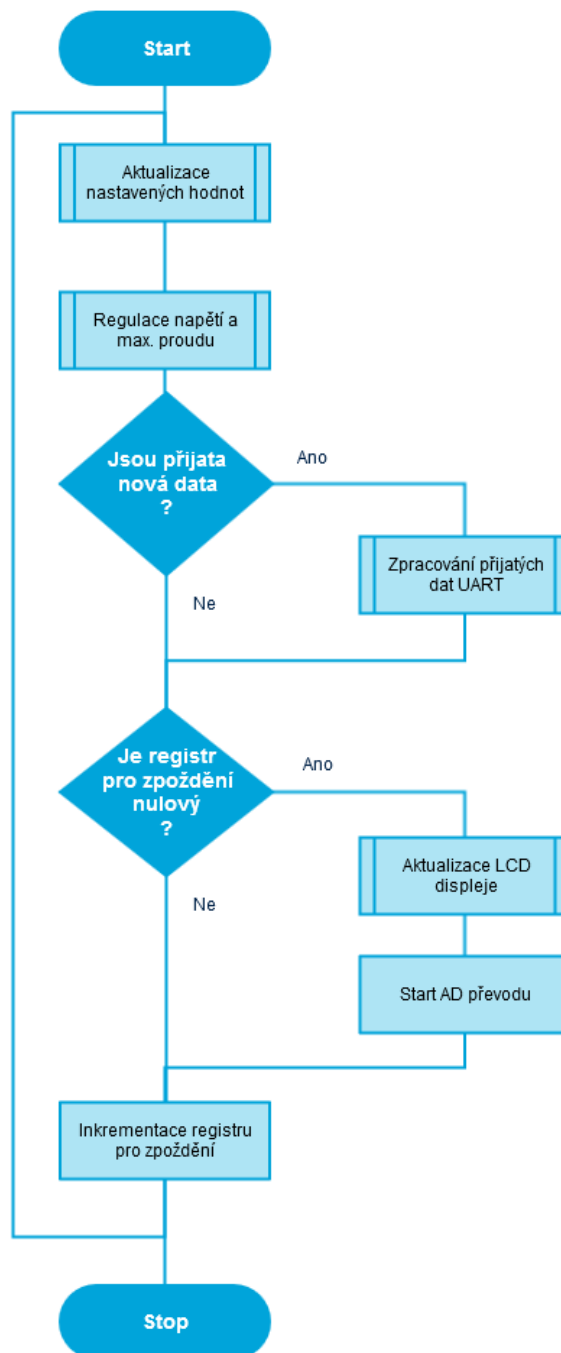
2.8 Programová část

Software pro tento zdroj je dělen na dvě části. Firmware pro mikrokontrolér a počítačový software, který slouží jak pro vzdálené řízení zdroje, tak pro zaznamenávání měřených parametrů zdroje.

2.8.1 Firmware pro MCU

Firmware pro MCU tvoří hlavní část programového vybavení navrženého a zkonstruovaného zdroje, jelikož zajišťuje funkčnost zdroje a je schopen pracovat i bez komunikace s počítačovým softwarem. Je psán v jazyce ANSI C ve vývojovém prostředí Atmel Studio 7.0 a je tvořen hlavním kódem a třemi knihovními kódy zajišťující komunikaci s periferními obvody, kterými jsou LCD displej, výkonové monitory a převodník USB/UART.

Hlavní kód je založen na běhu nekonečné smyčky a využití několika zdrojů přerušení zajišťujících obsluhu A/D převodníku, UART kanálu, čtení dat z power monitorů a příslušnou reakci na stisk tlačítek. Vývojový diagram nekonečné smyčky je zobrazen na obrázku 2.26.



Obrázek 2.26 Vývojový diagram nekonečné smyčky firmwaru mikrokontroléru

Po spuštění mikrokontroléru proběhne nastavení jeho vnitřních registrů pro vstupně/výstupní porty, A/D převodník, jednotku UART, externí přerušení, časovač 0 a časovač 1 generující PWM signál. Tabulka 2.6 shrnuje softwarové využití jednotlivých pinů dostupných portů použitého mikrokontroléru.

Po nastavení registrů proběhnou tři inicializační funkce, a to inicializace LCD displeje, I2C sběrnice a power monitorů INA219. Následně program vstoupí do nekonečné smyčky, která probíhá stále dokola.

Vzhledem k tomu, že zdroj může být řízen zároveň přes počítač i uživatelským

rozhraním na něm samotném, jsou hodnoty pro požadované výstupní napětí, maximální výstupní proud a stav výstupního měniče bufferovány, tedy ukládány do zvláštních proměnných, které jsou na začátku každého cyklu nekonečné smyčky překopírovány do pracovních proměnných.

Funkce regulace napětí a maximálního proudu provádí činnost, která je patrná z jejího vlastního názvu. Konkrétní popis regulace výstupního napětí a maximálního výstupního proudu je uveden v kapitole 2.3. Další činností, kterou tato funkce provádí je sledování napětí na USB sběrnici a pokud se toho napětí přiblíží k úrovni, při které zareaguje podpěťová ochrana vypnutím izolovaného měniče, dojde k omezení výstupního proudu tak, aby dále nedocházelo k snižování napětí na vstupu zdroje.

Pro příjem dat v UART kanálu je použito přerušování, v kterém jsou přijatá data, dle komunikačního rámce popsaného níže, uložena do pomocných registrů a je nastavena proměnná jako příznak signalizující přijetí nových nezpracovaných dat. Pokud je tento příznak nastaven, proběhne zpracování přijatých dat dle níže popsaného rámce.

Poslední funkcí prováděnou v nekonečné smyčce je aktualizace dat na LCD displeji, která je zpožděna pomocnou proměnnou, která je v každém cyklu porovnávána a inkrementována. Tím dojde ke snížení frekvence, se kterou se aktualizují data na displeji, což je uživatelsky příjemnější. Po každé aktualizaci LCD displeje dojde k programovému spuštění A/D převodu, který je popsán níže.

Tabulka 2.6 Programové využití pinů jednotlivých portů mikrokontroléru

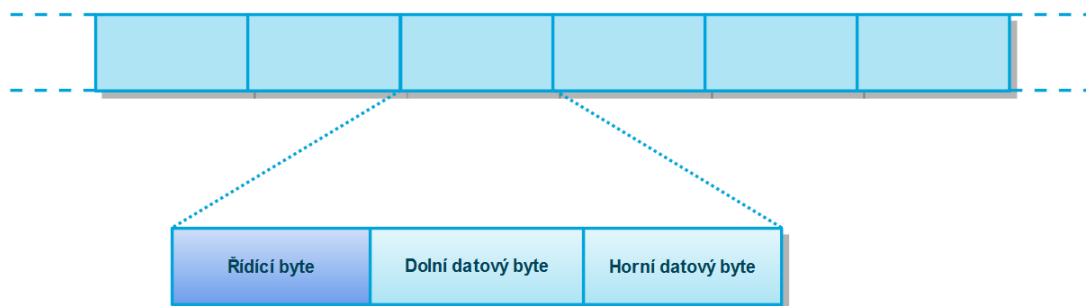
| Číslo pinu | PORT B | PORT C | PORT D |
|------------|---|--|--|
| 0 | Vstup s pull-up rezistorem pro tlačítko | Nevyužit | Vstup pro RXD linku UART |
| 1 | Výstup časovače 1 pro PWM | Nevyužit | Výstup pro TXD linku UART |
| 2 | Výstup časovače 1 pro PWM | Nevyužit | Výstup s pull-up rezistorem pro datový signál LCD displeje |
| 3 | Vstup s pull-up rezistorem pro tlačítko | Výstup pro spouštění výstupního DC/DC měniče | Výstup s pull-up rezistorem pro datový signál LCD displeje |
| 4 | Vstup s pull-up rezistorem pro tlačítko | Výstup pro SDA linku TWI | Výstup s pull-up rezistorem pro datový signál LCD displeje |
| 5 | Vstup s pull-up rezistorem pro tlačítko | Výstup pro SCL linku TWI | Výstup s pull-up rezistorem pro datový signál LCD displeje |
| 6 | Nevyužit (XTAL) | Nevyužit (RESET) | Výstup s pull-up rezistorem pro enable signál LCD displeje |
| 7 | Nevyužit (XTAL) | – | Výstup s pull-up rezistorem pro RS signál LCD displeje |

Pro zajištění korektní funkce výstupního měniče je měřeno výstupní napětí

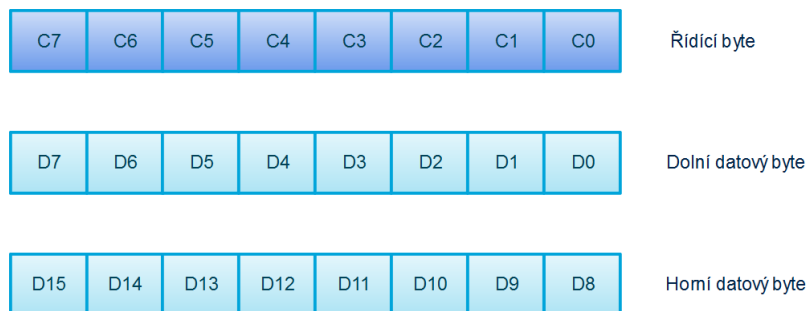
izolovaného měniče integrovaným A/D převodníkem s rozlišením 10 bitů. Pro toto měření byl zvolen sedmý multiplexovaný kanál a jako referenční napětí byla zvolena vnitřní napěťová reference 1,1V s připojeným kondenzátorem na příslušný pin. Předdělička hodinového signálu pro tento převodník byla nastavena na hodnotu 128, jelikož je výrobcem požadováno, aby hodnota frekvence tohoto signálu byla v rozmezí 50kHz až 200kHz pro maximální rozlišení A/D převodu [27]. Převodník je nastaven na programové spuštění pomocí příznaku ADSC a po dokončení převodu dojde k vyvolání přerušení, jehož obslužný program zpracuje výsledek, převede jej na reálnou hodnotu napětí a uloží do globální proměnné, která je porovnávána při požadavku na spuštění výstupního měniče.

Pro komunikaci s počítačovým softwarem je použita jednotka UART v normálním asynchronním režimu. Ta sice ve skutečnosti komunikuje pouze s převodníkem FT232R, ale pro samotný mikrokontrolér to není podstatné, jelikož jde pouze o příjem a vysílání předem stanoveného datového rámce, tedy komunikaci na úrovni hardwaru. Pro tento datový rámec bylo použito schéma 8N2, které značí použití osmi datových bitů, žádné parity a dvou stop bitů. Přenosová rychlost byla nastavena na 9600 Baud.

Pro komunikaci na úrovni softwaru byl vytvořen komunikační rámec, jehož struktura je zobrazena na obrázku 2.27. Tento rámec se skládá ze tří bytů, kde první byte je tzv. řídicí byte, a zbylé dva jsou datové byty, které jsou graficky znázorněny na obrázku 2.28. Posílaná data jsou 16bitová, jelikož power monitory INA219 poskytují data této velikosti a jsou po přijetí mikrokontrolérem přímo přeposílány do počítače. Více v kapitole 2.5.



Obrázek 2.27 Struktura komunikačního rámce



Obrázek 2.28 Struktura jednotlivých bytů z komunikačního rámce

Řídící byte obsahuje informaci o identifikaci dat, tedy o tom, jaké data obsahují následující dva datové byty a informaci o stavu výstupního měniče (vypnuto/zapnuto). Tabulka 2.7 obsahuje přidělení horních čtyř bitů (C7:C4) jednotlivým měřeným veličinám zdroje. Následující dva bity (C3:C2) jsou ponechány pro další možné využití při rozšiřování návrhu zdroje případně firmwaru a softwaru, jejich úroveň je defaultně nastavena do logické nuly. Poslední dva bity (C1:C0) nesou informaci o stavu výstupní měniče, kdy hodnota 00b udává stav zapnuto a hodnota 11b udává stav vypnuto.

Tabulka 2.7 Identifikační tabulka pro přenos hodnot požadovaných veličin

| Dec | C7 | C6 | C5 | C4 | Veličina |
|-----|-----|-----|-----|-----|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | Napětí USB sběrnice |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | Proud USB sběrnice |
| 2 | 0 | 0 | 1 | 0 | Výkon dodávaný USB sběrnici |
| 3 | 0 | 0 | 1 | 1 | Výstupní napětí zdroje |
| 4 | 0 | 1 | 0 | 0 | Výstupní proud zdroje |
| 5 | 0 | 1 | 0 | 1 | Výstupní výkon zdroje |
| 6 | 0 | 1 | 1 | 0 | Výstupní napětí izolovaného měniče |
| 7 | 0 | 1 | 1 | 1 | Nastavené výstupní napětí zdroje |
| 8 | 1 | 0 | 0 | 0 | Nastavený maximální výstupní proud zdroje |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 14 | 1 | 1 | 1 | 0 | Stav počítačového programu (z PC do MCU) |
| 15 | 1 | 1 | 1 | 1 | Ovládání měniče (z PC do MCU) |

Datové byty jsou posílány vždy bezprostředně po řídícím bytu v pořadí dolní byte a následně horní byte. Tabulka 2.8 obsahuje data přiřazená příkazům pro ovládání výstupního měniče a informaci o stavu počítačového softwaru.

Tabulka 2.8 Význam jednotlivých hodnot pro příkazy

| D15:D8 | D7:D0 | Význam hodnoty |
|------------------|------------------|--|
| 11001000b (200d) | 11001000b (200d) | Počítač připraven pro příjem dat – začni vysílat |
| 00000000b (0d) | 00000000b (0d) | Program vypnut – zastav vysílání |
| 11001000b (200d) | 11001000b (200d) | Zapni výstupní měnič |
| 00000000b (0d) | 00000000b (0d) | Vypni výstupní měnič |

Pro výpočet reálné hodnoty požadovaného (nastaveného) výstupního napětí a maximálního výstupního proudu z přijatých dat se využít stejný způsob jako u power monitorů INA219, více v kapitole 2.5. Jako LSB hodnota pro výpočet požadovaného výstupního napětí je zvolena hodnota 4mV. Pro požadovaný maximální výstupní proud je tato hodnota 50μA.

Pro komunikaci s digitálními power monitory INA219, komunikující přes sběrnici I2C, byl vytvořen knihovní kód s funkcemi zajišťující inicializaci (konfigurace, kalibrace), zápis do vnitřních registrů obvodu a čtení měřených hodnot, více v kapitole 2.5. Tyto funkce využívají staženého knihovního kódu [32] zajišťujícího komunikaci po sběrnici I2C. Z tohoto kódu je využita funkce pro inicializaci I2C sběrnice, funkce pro

zahájení a ukončení komunikace a dále funkce pro čtení dat.

Knihovní kód pro komunikaci s displejem, byl převzat z [11] a upraven pro komunikaci s řadičem použitého LCD displeje a jeho odlišné zapojení. Jedná se o řadič NT7603H-BDT01 [32], pro který byla vytvořena nová inicializační sekvence. Komunikace s displejem probíhá v čtyřbitovém módu, kdy jsou využity pouze horní čtyři datové vodiče a dolní čtyři jsou uzemněny. Zápis dat probíhá tak, že se nejdříve nastaví signál RS do požadované úrovně, dle zápisu dat či instrukce. Poté se signál E (enable) nastaví do úrovně logické jedničky a zapíše se horní čtyři bity, které se následně potvrdí nastavením E signálu do úrovně logické nuly. Stejným způsobem proběhne i zapsání dolních čtyřech bitů.

2.8.2 Software pro PC

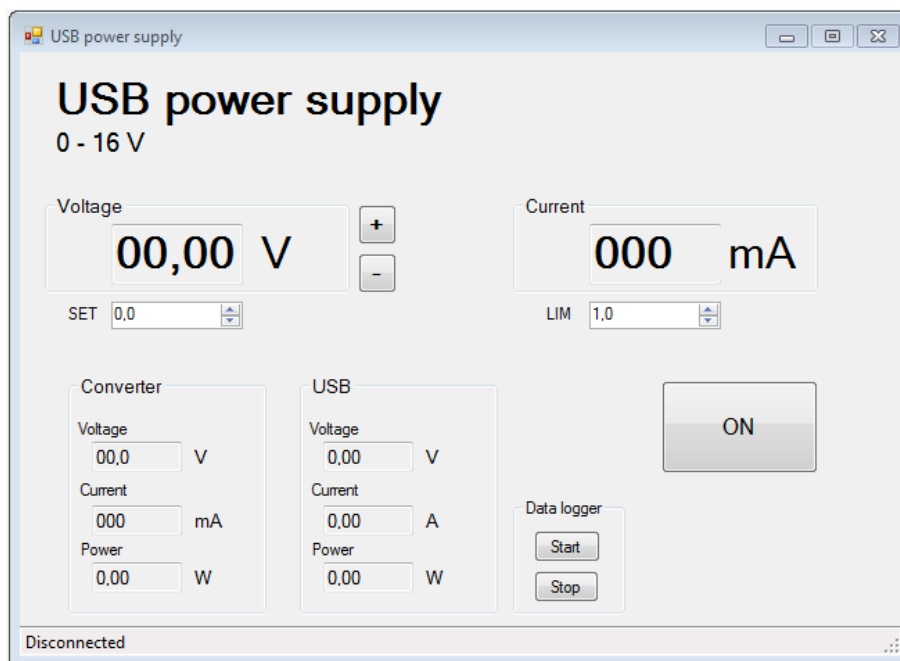
Software pro PC tvoří druhou část programového vybavení navrženého a zkonstruovaného zdroje. Jeho hlavním úkolem je možnost „vzdáleného“ ovládání zdroje pomocí grafického uživatelského rozhraní (GUI) a záznam měřených parametrů.

Software je psaný objektově v programovacím jazyce C# ve vývojovém prostředí Visual Studio 2013, jako jediná třída s privátními metodami a vlastnostmi.

Pro komunikaci se zdrojem je využit sériový port, tvořený převodníkem USB/UART FT232R, viz kapitola 2.7. Komunikaci s tímto převodníkem zajišťuje knihovna FTD2XX_NET vytvořená výrobcem obvodu a dostupná na jeho webových stránkách [33]. Tato knihovna je založena na ovladačích s přímým přístupem D2XX. Dále jsou využity ovladače virtuálního COM portu VCP (Virtual Com Port) pro komunikaci s tímto virtuálním portem.

Pro správnou funkci programu je třeba nainstalovat oba druhy ovladačů, což zajišťuje CDM (Combined Driver Model) balík poskytovaný výrobcem obvodu [34].

Software pracuje ve dvou vláknech, v jednom běží samotné GUI a v druhém je vyvolávána událost při přijetí dat na sériovém portu. Na obrázku 2.29 je zobrazeno vytvořené grafické uživatelské rozhraní.



Obrázek 2.29 GUI počítačového softwaru

Po spuštění softwaru dojde detekci veškerých aktuálně připojených obvodů výrobce FTDI. V případě, že není žádný takový obvod připojen, bude tato skutečnost signalizována hláškou „Connection error“ v levém dolním rohu. Při detekování připojeného obvodu je ověřeno jeho sériové číslo, kterým je obvod identifikován, více v kapitole 2.7, a pokud dojde ke shodě, je zjištěno jméno virtuálního sériového portu, který je tvořen právě tímto obvodem. Pokud je tedy software spuštěn dříve, než je zdroj připojen k počítači, je vyhodnocena chyba spojení. V tomto případě lze provést opětovný pokus o spojení dvojklikem na chybovou hlášku v levém dolním rohu.

Se znalostí čísla virtuálního portu vytvoří program instanci třídy serialPort, se kterou bude software pracovat až do jeho ukončení. Přes nově otevřený sériový port jsou do mikrokontroléru poslána data signalizující připravenost softwaru přijímat měřená data.

Nyní lze provádět zapínání a vypínání výstupního měniče stiskem tlačítka s textem ON, resp. OFF, změnu výstupního napětí a maximálního výstupního proudu příslušnými tlačítky, případně zapsáním konkrétní hodnoty do prvku s označením SET, pro nastavení výstupního napětí a prvku s označením LIM, pro nastavení maximálního výstupního proudu.

V levé spodní části GUI jsou zobrazovány aktuální měřené hodnoty na výstupu zdroje (označeno Converter) a na vstupu zdroje (označeno USB).

Poslední funkcí softwaru je záznam měřených parametrů zdroje do souboru v CSV formátu, který lze snadno otevřít v tabulkových editorech a dále s ním pracovat. Záznam se spustí stiskem tlačítka Start v části okna Data dogger. Je možné jej pozastavit, anebo úplně zastavit, přičemž při jeho zastavení dojde k ukončení ukládání dat do vytvořeného souboru.

Při spuštění záznamu je vytvořen soubor s názvem „meas_data_0“, pokud je již

soubor s tímto názvem ve složce, ve které je umístěn spustitelný soubor softwaru, nalezen, je inkrementováno číslo v názvu souboru a složka je znovu prohledána. Při neexistenci shody je soubor vytvořen. Na první řádek je zapsáno datum vytvoření tohoto souboru, na druhý popis sloupců, do kterých budou ukládány příslušná data. Na obrázku 2.30 je zobrazen náhled do tohoto souboru s uloženými daty.

| | A | B | C | D | E | F | G | H |
|----|----------------|------------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------------|------------------------|---------------------|
| 1 | 20.5.2016 0:00 | | | | | | | |
| 2 | Time [ms] | Converter status | USB voltage [V] | USB current [A] | USB power [W] | Converter voltage [V] | Converter current [mA] | Converter power [W] |
| 3 | | 0 ON | 4,86 | 0,21 | 1,02 | 0,11 | 13 | 0 |
| 4 | | 0,2 ON | 4,86 | 0,21 | 1,01 | 0,11 | 13 | 0 |
| 5 | | 0,4 ON | 4,86 | 0,21 | 1,01 | 0,11 | 13 | 0 |
| 6 | | 0,6 ON | 4,86 | 0,2 | 0,99 | 0,11 | 13 | 0 |
| 7 | | 0,8 ON | 4,86 | 0,2 | 0,99 | 0,11 | 13 | 0 |
| 8 | | 1 ON | 4,85 | 0,2 | 0,99 | 0,11 | 13 | 0 |
| 9 | | 1,2 ON | 4,86 | 0,21 | 1,01 | 0,11 | 13 | 0 |
| 10 | | 1,4 ON | 4,86 | 0,21 | 1,02 | 0,11 | 13 | 0 |
| 11 | | 1,6 ON | 4,86 | 0,21 | 1,01 | 0,11 | 13 | 0 |
| 12 | | 1,8 ON | 4,86 | 0,21 | 1,01 | 0,11 | 13 | 0 |
| 13 | | 2 ON | 4,86 | 0,2 | 0,99 | 0,11 | 13 | 0 |
| 14 | | 2,2 ON | 4,86 | 0,2 | 0,99 | 0,11 | 13 | 0 |
| 15 | | 2,4 ON | 4,81 | 0,26 | 1,22 | 1,38 | 140 | 0,19 |
| 16 | | 2,6 ON | 4,82 | 0,26 | 1,25 | 1,38 | 140 | 0,19 |
| 17 | | 2,8 ON | 4,82 | 0,26 | 1,25 | 1,38 | 140 | 0,19 |
| 18 | | 3 ON | 4,82 | 0,26 | 1,24 | 1,38 | 140 | 0,19 |

Obrázek 2.30 Náhled na měřená uložená data ve formátu CSV

2.9 Rozvaha chlazení

Z hlediska ztrátových výkonů obsahuje tento zdroj tři významné bloky, u nichž je třeba se zabývat chlazením a problematikou ztrát.

Prvním blokem je izolovaný DC/DC měnič popsáný v kapitole 2.4.3. Uvedený pracovní teplotní rozsah výrobcem je $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$, ve kterém dokáže pracovat bez odlehčení [35]. Vzhledem k použití plastového pouzdra není předpokládáno přídavné chlazení.

Dalším blokem je lineární integrovaný stabilizátor NCP1117 blíže popsáný v kapitole 2.2. Ze závislosti velikosti měděné plochy pod tímto stabilizátorem na maximálním ztrátovém výkonu pro pouzdro DPAK, uvedené v datasheetu [17], vyplývá, že pro velikost plochy $5 \times 5\text{ mm}$, což je také minimální požadovaná plocha při návrhu DPS, je maximální ztrátový výkon asi $1,15\text{ W}$. Pro vypočtený výkon 420 mW , viz kapitola 2.2, je tato minimální plocha dostačující.

Posledním blokem je spínaný regulátor LTC3114-1. Jeho maximální účinnost je 96% , při této účinnosti by tedy docházelo pouze k 4% ztrátám, ale vzhledem ke skutečnosti, že bude výstupní napětí regulováno, nebude jeho ztrátový výkon konstantní. Kvůli odporu kanálu spínacích tranzistorů v otevřeném stavu, který je $250\text{ m}\Omega$, vznikají největší tepelné ztráty při maximálním výstupním proudu. Dalším ztrátovým prvkem je vnitřní lineární LDO stabilizátor, který se významně podílí na ztrátovém výkonu při velkých hodnotách vstupního napětí.

Největší možný teoretický výstupní výkon je při výstupním napětí 12 V a proudu 1 A , tedy 12 W . Pro tyto parametry je, dle charakteristik v datasheetu [12], účinnost 86% . Ztrátový výkon na tomto regulátoru je tedy dán vztahem 2.25 a jeho

hodnota je 1,95 W.

$$P_{ztr,max} = \frac{P_{výst}}{\eta} - P_{výst} , \quad (2.25)$$

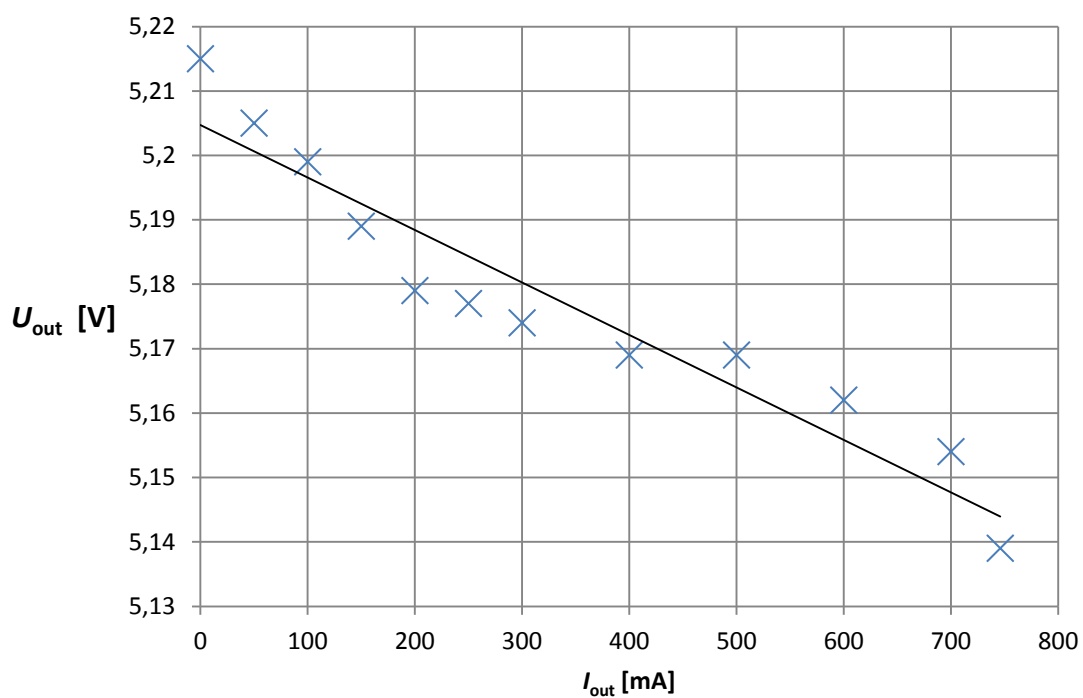
kde $P_{výst}$ je výstupní výkon ve W a η je účinnost.

Obvod má krom klasických vývodů také kovový vývod na spodní straně pouzdra (power pad), sloužící jako plocha pro odvod tepla z regulátoru a také jako výkonová zem. Dle doporučení výrobce je vývod připájen k DPS na co největší možnou měděnou plochu, při použití dvou nebo vícevrstvé DPS jsou tyto vrstvy spojeny prokovenými otvory, jež jsou při pájení zality cínem. U finální DPS je pod obvodem umístěn jeden prokovený otvor o průměru 2,2 mm, přes který je power pad obvodu připájen k oběma vrstvám měděné plochy. Tento stav se během testu dlouhodobého zatížení, jak u prototypu, tak u finální desky ukázal jako dostatečný pro chlazení.

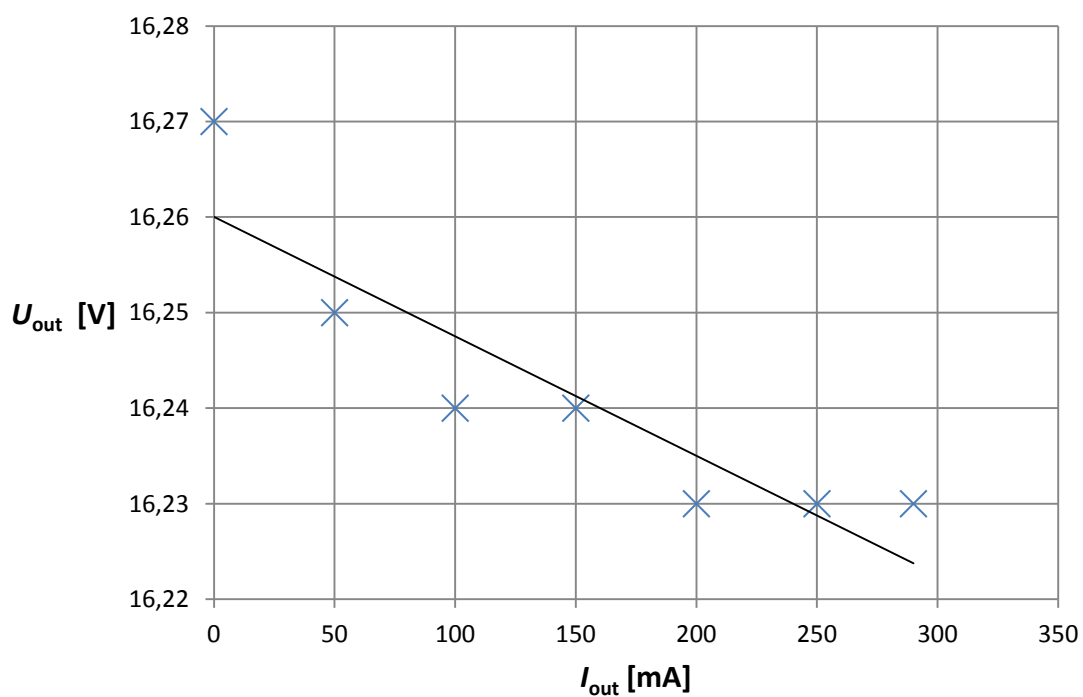
3 KONSTRUKCE A MĚŘENÍ

3.1 Výsledky měření prototypu

Dle navrženého schématu byl v rámci semestrálního projektu zkonstruován prototyp, který byl podroben měření. Změřena byla zatěžovací charakteristika zdroje pro hodnotu výstupního napětí naprázdno 5,215 V a 16,27 V, tyto charakteristiky jsou uvedeny na obrázku 3.1, resp. 3.2, níže.



Obrázek 3.1 Zatěžovací charakteristika regulátoru pro výstupní napětí 5,215 V naprázdno



Obrázek 3.2 Zatěžovací charakteristika regulátoru pro výstupní napětí 16,27 V naprázdno

3.2 Desky plošných spojů

Navržený napájecí zdroj se skládá ze tří DPS, kde dvě z nich tvoří funkční části zdroje a třetí je použita primárně pro mechanické upevnění čtyř tlačítek (Ovládací část). Vzhledem k tomu, že tlačítka slouží pro komunikaci mezi uživatelem a mikrokontrolérem, lze tuto třetí DPS zařadit do řídicí části zdroje.

Všechny DPS jsou oboustranné s tloušťkou nosného substrátu 1,5mm, materiál FR4 a tloušťkou měděného povlaku 35 μ m. Desky funkčních bloků jsou prokoveny, u desky s tlačítky je využita pouze jedna vrstva a použití prokovených otvorů není tedy nezbytné.

Vzhledem k požadavku na galvanickou izolaci vstupní a výstupní části zdroje je na všech deskách provedeno oddělní izolační mezerou o minimální tloušťce 3mm. Izolační mezera je také vytvořena po obvodu desek aby se zamezilo případné vazbě přes přístrojovou krabičku v případě poruchy.

Propojení mezi deskami funkčních bloků je zajištěno pomocí pinových lišt a dutinových lišt jako protikus. Toto spojení je rozebíratelné, což je výhodné v případě možných oprav nebo úprav. Jejich nevýhoda ovšem spočívá v přechodovém odporu spoje, který by byl značně menší, při použití pouhých pinových lišt elektricky propojených s deskami pájením. Dále jsou také náchylnější vůči rušivým vlivům obou měničů. Z tohoto důvodu byly na analogové spoje vedené těmito lištami přidány keramické kondenzátory o hodnotě 10 nF zajišťující útlum pro rušivé signály.

Veškeré návrhy DPS byly vytvořeny v návrhovém programu EAGLE 7.1.0.

3.2.1 Řídicí část

Tato deska obsahuje tři základní bloky, které se podílejí na řízení zdroje a komunikaci s uživatelem a počítačem. Těmito bloky jsou převodník FT232R, mikrokontrolér ATmega328 a LCD displej DEM 16209 SBH-PW-N. Na obrázku 3.3 je zachycena tato osazená DPS.

Spojení mezi převodníkem FT232R a počítačem je provedeno pomocí konektoru USB 2.0 typu B. Z hlediska mechanické pevnosti je použit THT konektor, který zaručuje větší mechanickou odolnost pájených spojů tohoto konektoru.

Dalším spojením na této desce je komunikační sériový kanál mezi převodníkem a mikrokontrolérem. Každá z těchto součástí pracuje v izolované části zařízení, komunikace tedy probíhá přes dva optočleny PC3H7J00000F izolující přijímací a vysílací linku sériového kanálu.

Pro programování mikrokontroléru je využito rozhraní SPI, které se s programátorem propojuje pomocí dvouřádkové SMT kolíkové lišty (SV9) s roztečí 1,27mm. Tato lišta je zároveň využita pro propojení mikrokontroléru s tlačítky, k jejichž desce je připojen plochý kabel s konektorem připojitelným k této liště.

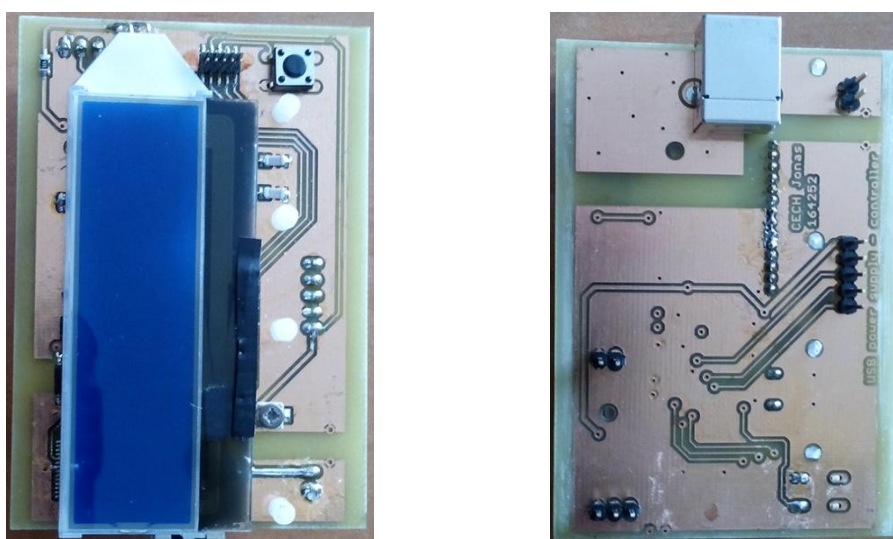
Do kanálu integrovaného AD převodníku použitého mikrokontroléru vstupuje dělené výstupní napětí izolovaného DC/DC měniče TMR6-0512. Toto napětí je přivedeno přes pinovou lištu SV6.

Jako výstupy z této desky jsou výstupy filtračních RC členů druhého řádu pro

PWM signál a logický výstup pinu 3 portu C, kterým je spuštěn výstupní měnič. Dalším výstupem a zároveň i vstupem je linka I2C(TWI) přes kterou probíhá komunikace s dvěma power monitory.

Deska s tlačítky je doplněna o layout pro debounce obvod, zajišťující filtraci záskmitů vznikající při spínání a rozpínání tlačítek. Použitá tlačítka mají definovanou maximální dobu trvání záskmitů 5ms při opakovaném stisku (3x až 4 za sekundu). Layout pro debounce obvody lze tedy využít při opotřebování tlačítek, kdy se bude jistě doba trvání záskmitů při stisku prodlužovat a jejich softwarová eliminace by příliš omezovala chod firmwaru a také samotného uživatele.

Poslední význačnou částí je již zmíněný LCD displej. Ten je k desce připevněn pouze jeho připájenými vývody a podepřen plastovými distančními sloupky.



Obrázek 3.3 Osazená DPS řídící části zdroje (strana součástek vlevo, strana spojů vpravo)

3.2.2 Napájecí část

Napájecí část zajišťuje napájení řídící části a zároveň plní hlavní funkci navrženého zdroje. Je tvořena izolovaným DC/DC měničem TMR6-0512, obvodem DC/DC měniče s obvodem integrovaného spínaného regulátoru LTC3114-4, dvou power monitorů INA219 a obvodem přepět'ové a podpět'ové ochrany zdroje.

Napájecí cestičky, kterými protéká proud od USB konektoru do izolovaného měniče, a z jeho výstupu přes výstupní měnič k výstupním svorkám jsou pocínovány pro snížení jejich odporu.

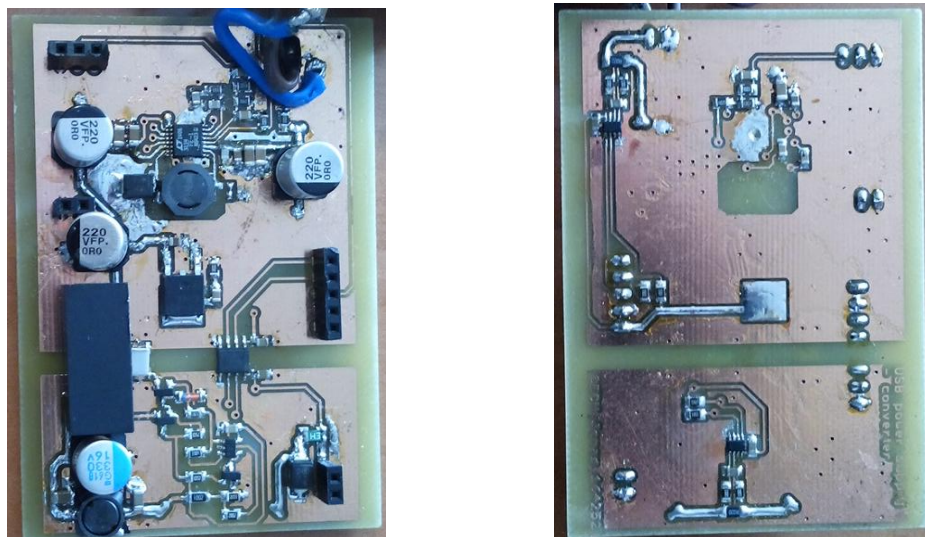
Vzhledem ke snazší pájitelnosti na měděné polygony byly použity termální plošky i přes doporučení je u spínaných obvodů nevyužívat [36].

Pod cívkou výstupního měniče je odstraněn polygon z důvodu omezení parazitních kapacit mezi cívkou a zemí [37].

Výstupní svorky zdroje jsou k desce připojeny měděnými lankovými vodiči o ploše $0,75 \text{ mm}^2$ pájením, aby byl co nejvíce minimalizován přechodový odpor. Délka těchto vodičů je dostatečná k manipulaci s deskou uvnitř krabičky při odejmutí bočního

panelu.

Výška součástek osazených na straně spojů má dostatečně malou výšku, takže nedochází ke kontaktu mezi nimi a spodní stěnou krabičky.



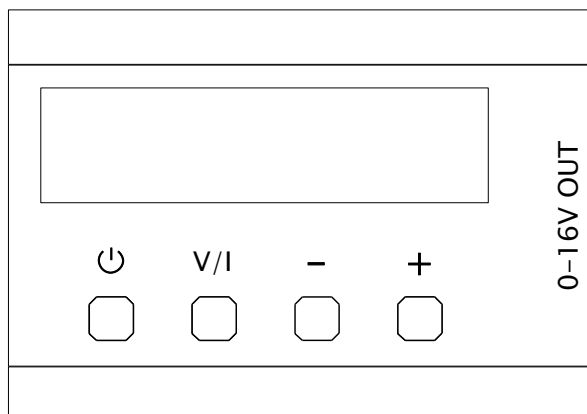
Obrázek 3.4 Osazená DPS napájecí části zdroje (strana součástek vlevo, strana spojů vpravo)

3.3 Mechanické zpracování

Vzhledem k požadavku na kompaktnost zdroje a jeho napájení z USB sběrnice byl kladen důraz na malé rozměry přístrojové krabičky, do níž je zdroj instalován.

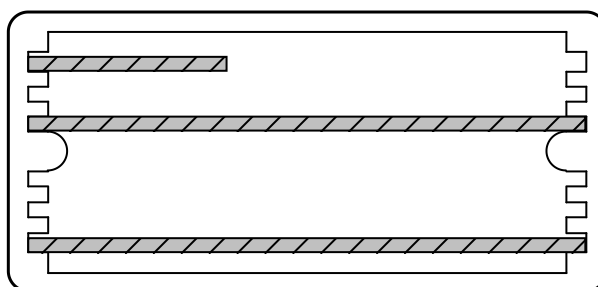
Z nabídky dostupných přístrojových krabiček byla vybrána univerzální hliníková krabička 1457C802 výrobce Hammond s vnějšími rozměry 59mm x 80mm x 30,9mm, která je tvořena dvěma bočními kryty a tělem s vnitřními drážkami pro uchycení DPS. Pro tuto krabičku byla provedena rozvaha o rozmístění prvků pro požadované jednoduché uživatelské rozhraní tvořené LCD displejem a čtyřmi tlačítky a předběžné rozmístění součástek na DPS, která ukázala, že krabička je vhodná pro toto použití.

Rozmístění prvků pro uživatelské rozhraní je vyobrazeno na obrázku 3.5, níže.



Obrázek 3.5 Plán rozmístění součástek pro uživatelské rozhraní

Krabička obsahuje šest vnitřních drážek pro uchycení DPS zasunutím, z nichž byly využity tři. Na obrázku 3.6, níže, je zobrazen boční pohled na krabičku v řezu, zachycující umístění DPS.



Obrázek 3.6 Náhled umístění DPS uvnitř krabičky – boční pohled

Displej není ke krabičce nijak uchycen (z důvodu snadné manipulace s DPS), vývody je zasunut do řídicí DPS, zapájen a podepřen distančními sloupky tak, aby při zasunutí DPS do drážek přiléhal k vnitřní stěně krabičky.

Tlačítka jsou připájena na tlačítkové DPS, která je zasunuta do horní drážky a podepřena distančními sloupky o řídicí DPS. Spojení je zajištěno plochým kabelem s konektorem.

Otvor pro displej byl vyfrézován, otvory pro tlačítka předvrtány a následně dopilovány ručně, vzhledem k atypickému tvaru tlačítek.

Boční panely byly využity pro vstupní USB konektor typu B, který je připájen k řídicí DPS a při přiložení bočního panelu je vsunut do čtvercového otvoru. V druhém bočním panelu jsou vyvrtány dva otvory, v nichž jsou uchyceny dvě zdičky spojené se silovou DPS dvěma vodiči.



Obrázek 3.7 Umístění osazených DPS v krabičce

Zvolená krabička 1457C802 se vyznačuje stupněm krytí IP65, který udává odolnost vůči nebezpečnému dotyku jakoukoliv pomůckou, vniknutí prachu a také odolnost vůči stříkající vodě ze všech směrů. Jelikož byly do krabičky vytvořeny otvory, které nebyly nijak zajištěny ve smyslu tohoto stupně krytí, došlo ke snížení stupně krytí (pravděpodobně na IP40).

Pro popis jednotlivých tlačítek a zajištění částečné ochrany LCD displeje proti prachu a doteku je horní panel krabičky přelepen samolepící PVC fólií s potiskem pro jednotlivá tlačítka a označení výstupních svorek.

3.4 Měření finální verze

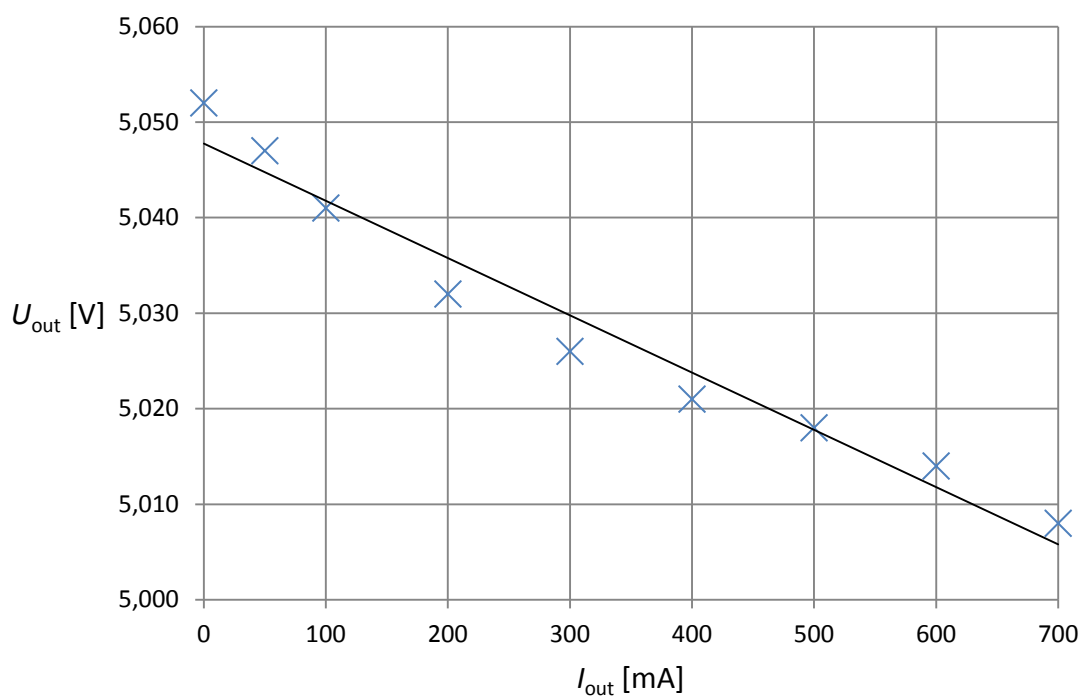
Po zkonstruování finální verze zdroje bylo provedeno měření jeho základních parametrů. Výsledky jsou uvedeny v příslušných kapitolách níže.

Zatěžovací charakteristiky, měření závislosti velikosti zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu a měření účinnosti bylo provedeno v celém rozsahu výstupního proudu, který byl zdroj při daném výstupním napětí schopen poskytnout. Při tomto měření nebyla funkce omezení maximálního výstupního proudu aktivní z důvodu jejího možného ovlivnění výsledků měření. Při překročení maximálního možného výstupního proudu, bez této funkce, dojde k samovolnému vypnutí zdroje vlivem integrované ochrany modulového izolovaného měniče TMR6-0512.

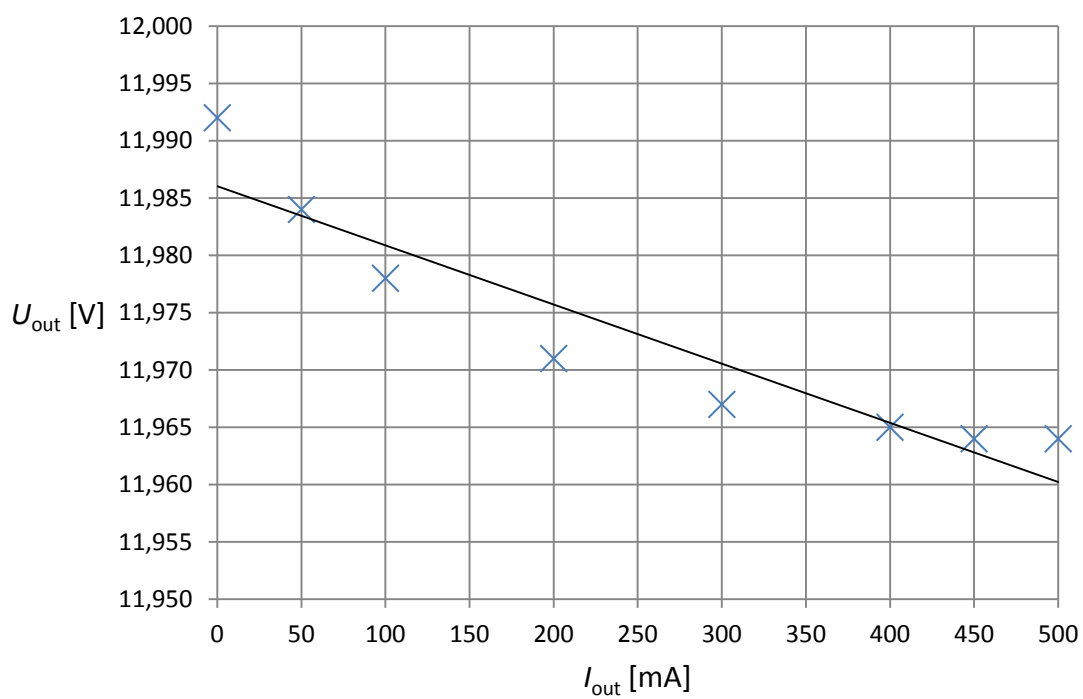
3.4.1 Zatěžovací charakteristiky

Zkonstruovaný zdroj byl zatížen pro tři různé velikosti výstupního napětí, konkrétně pro 5 V, 12 V a 16 V. Tyto napětí představují hodnoty, při kterých měnič pracuje v buck módu (napětí 5 V), boost módu (napětí 16 V) a v módu na hranici předchozích dvou (napětí 12 V), jelikož velikost vstupního napětí je 12 V. Tyto zatěžovací charakteristiky jsou zobrazeny na obrázku 3.8, 3.9 a 3.10. Při jejich měření byl zdroj zatížen elektronickou zátěží PEL-300 v režimu konstantního proudu.

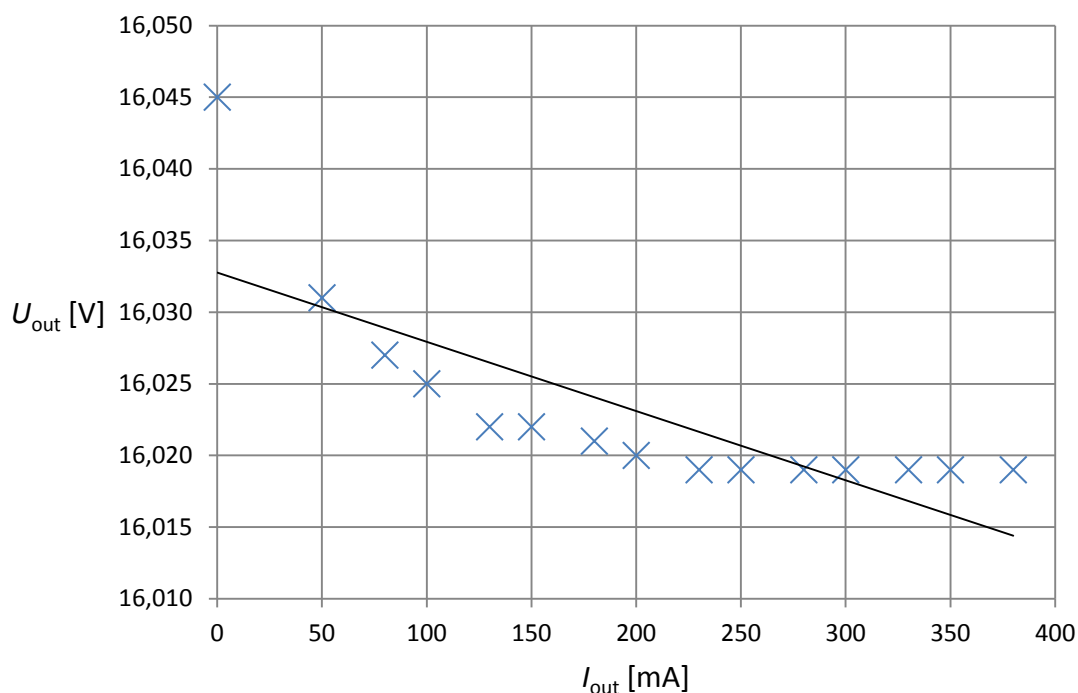
Pro výstupní napětí $U_{out0} = 5,052$ V je pokles napětí při maximálním možném výstupním proudu 44 mV. Pro výstupní napětí $U_{out0} = 11,992$ V je pokles 28 mV a pro výstupní napětí $U_{out0} = 16,045$ V je 26 mV.



Obrázek 3.8 Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 5,052V$



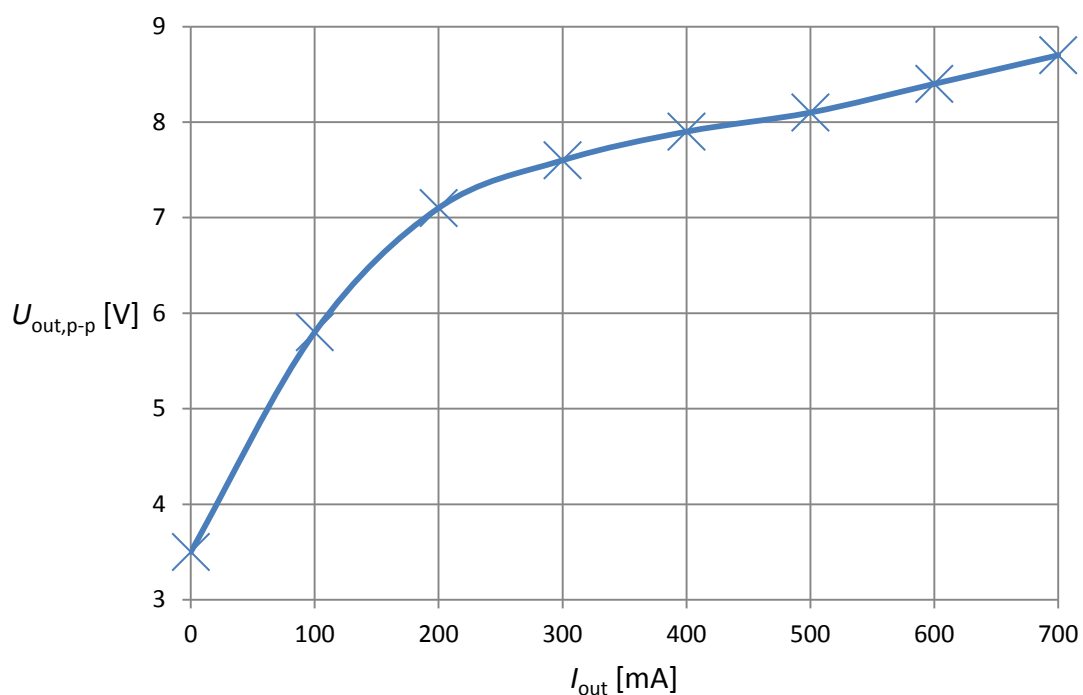
Obrázek 3.9 Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 11,992V$



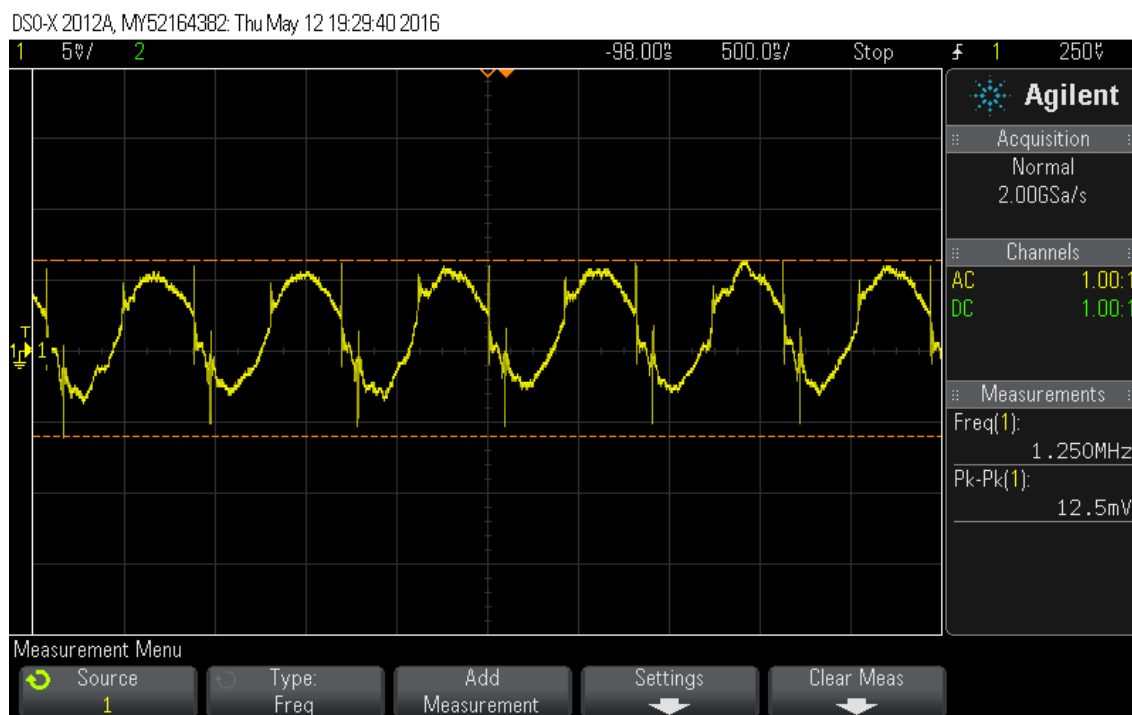
Obrázek 3.10 Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 16,045V$

3.4.2 Zvlnění výstupního napětí

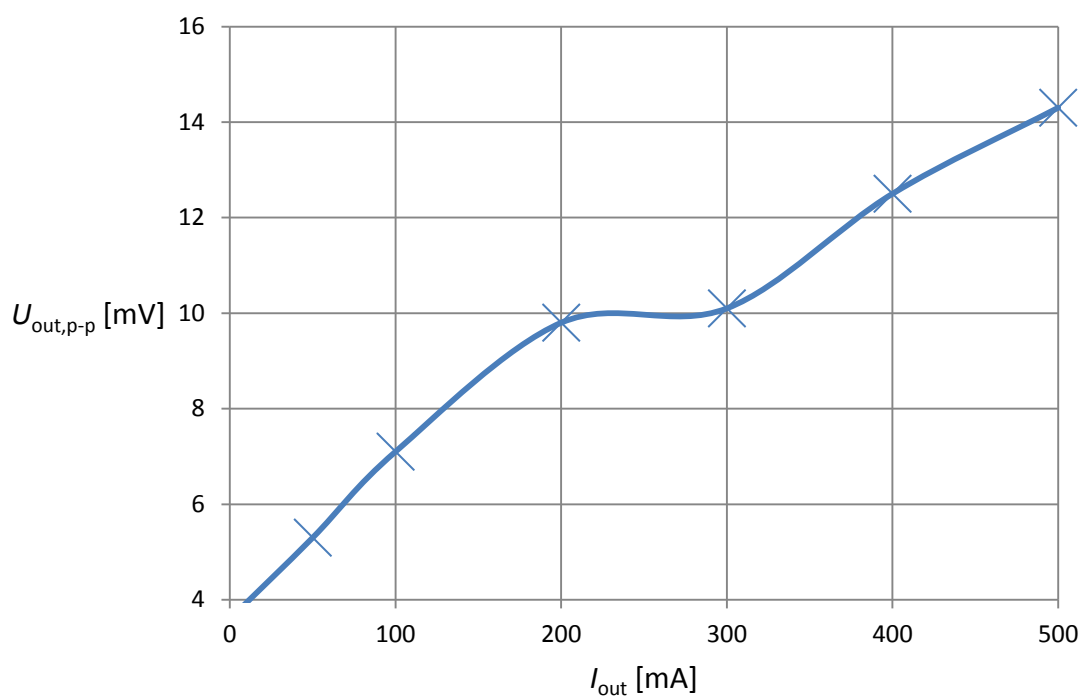
Zvlnění výstupního napětí bylo měřeno na posledním výstupním kondenzátoru osciloskopickou sondou, za pomoci speciálního nástavce nahrazujícího zemnicí krokodýlek krátkým a přímým spojením tzv. ground tip. Ten slouží redukci parazitních vlastností měřicího spoje při použití krokodýlku a tedy k omezení vysokofrekvenčních špiček, které v měřeném signálu mají mnohem menší velikost, případně v něm nejsou obsaženy vůbec. Útlum sondy byl nastaven na hodnotu 1:1 z důvodu využití plné citlivosti kanálu osciloskopu, jelikož velikost měřeného zvlnění dosahuje malých hodnot [38]. Pro měření tohoto zvlnění byl použit digitální osciloskop Agilent DSO-X 2012A.



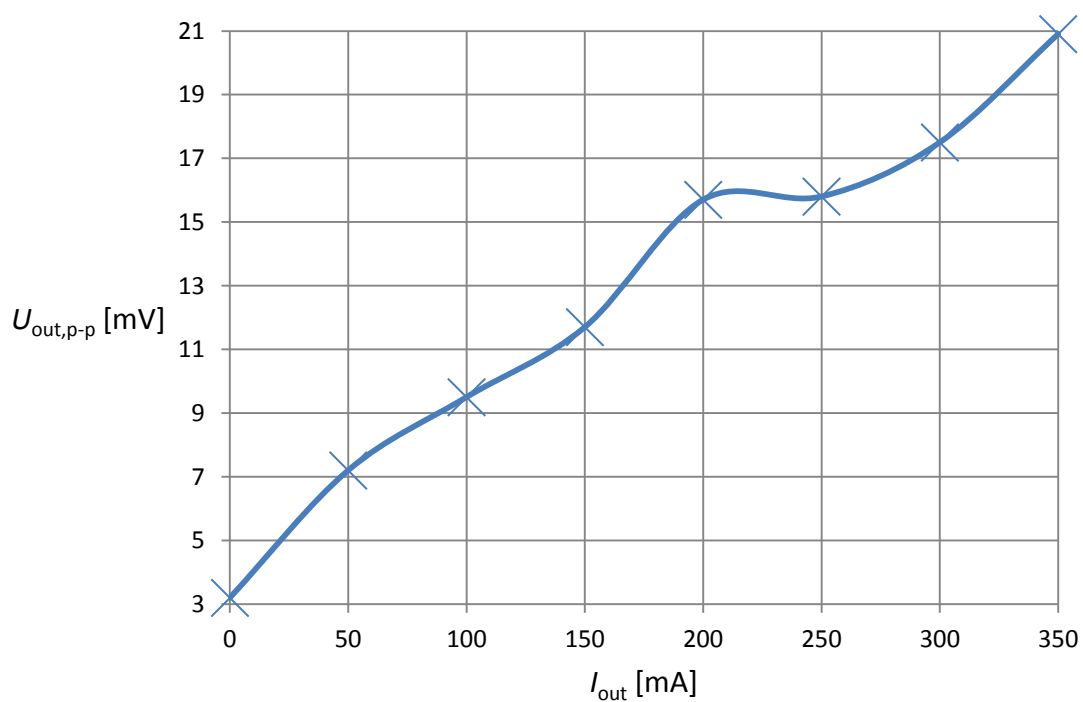
Obrázek 3.11 Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu pro $U_{out0} = 5,12V$



Obrázek 3.12 Časový průběh zvlnění výstupního napětí pro $U_{out0} = 5,12V$ a $I_{out} = 400mA$



Obrázek 3.13 Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu pro $U_{out0} = 12,06V$



Obrázek 3.14 Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu pro $U_{out0} = 16,10V$

3.4.3 Přesnost výstupního napětí a proudu

Tabulka 3.1 obsahuje hodnoty nastaveného požadovaného napětí, měřeného napětí

obvodem INA219 a napětí měřeného přesným referenčním měřidlem. Z těchto měřených hodnot je patrné, že napětí měřené obvodem INA219 je průměrně o 13,2 mV nižší, než napětí měřené referenčním měřidlem. Jako referenční měřidlo byl použit stolní multimetr Agilent 34410A.

Tabulka 3.2 obsahuje hodnoty výstupního proudu měřené power monitorem INA219 s rozlišením 1 mA a hodnoty měřené referenčním měřidlem.

Dle vztahu 3.1 byla pro velikost výstupní napětí a proudu vypočtena odchylka

$$\delta_X = \frac{X_{\text{měřená}} - X_{\text{skutečná}}}{X_{\text{skutečná}}} * 100, \quad (3.1)$$

Kde $X_{\text{měřená}}$ je veličina měřená měřicím přístrojem v příslušných jednotkách a $X_{\text{skutečná}}$ je skutečná hodnota

Tabulka 3.1 Přesnost výstupního napětí zdroje

| $U_{\text{nastavené}} [\text{V}]$ | $U_{\text{měřené}} [\text{V}]$ | $U_{\text{referenční}} [\text{V}]$ | $\delta_U [\%]$ |
|-----------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|-----------------|
| 0,0 | 0 | 0,007863 | -100,00 |
| 0,1 | 0,11 | 0,120 | -8,33 |
| 0,3 | 0,32 | 0,332 | -3,61 |
| 0,5 | 0,52 | 0,535 | -2,80 |
| 1,0 | 1,00 | 1,014 | -1,38 |
| 1,5 | 1,50 | 1,509 | -0,60 |
| 2,0 | 2,01 | 2,021 | -0,54 |
| 3,0 | 3,00 | 3,018 | -0,60 |
| 4,0 | 4,00 | 4,012 | -0,30 |
| 5,0 | 5,01 | 5,021 | -0,22 |
| 5,5 | 5,50 | 5,517 | -0,31 |
| 6,0 | 6,00 | 6,014 | -0,23 |
| 6,5 | 6,50 | 6,509 | -0,14 |
| 7,0 | 7,01 | 7,023 | -0,19 |
| 8,0 | 8,00 | 8,015 | -0,19 |
| 9,0 | 9,01 | 9,022 | -0,13 |
| 10,0 | 10,00 | 10,012 | -0,12 |
| 11,0 | 11,00 | 11,013 | -0,12 |
| 12,0 | 12,00 | 12,020 | -0,17 |
| 13,0 | 13,01 | 13,024 | -0,11 |
| 14,0 | 14,00 | 14,012 | -0,09 |
| 15,0 | 15,00 | 15,015 | -0,10 |
| 15,5 | 15,51 | 15,524 | -0,09 |
| 16,0 | 16,00 | 16,017 | -0,11 |

Tabulka 3.2 Přesnost měření výstupního proudu

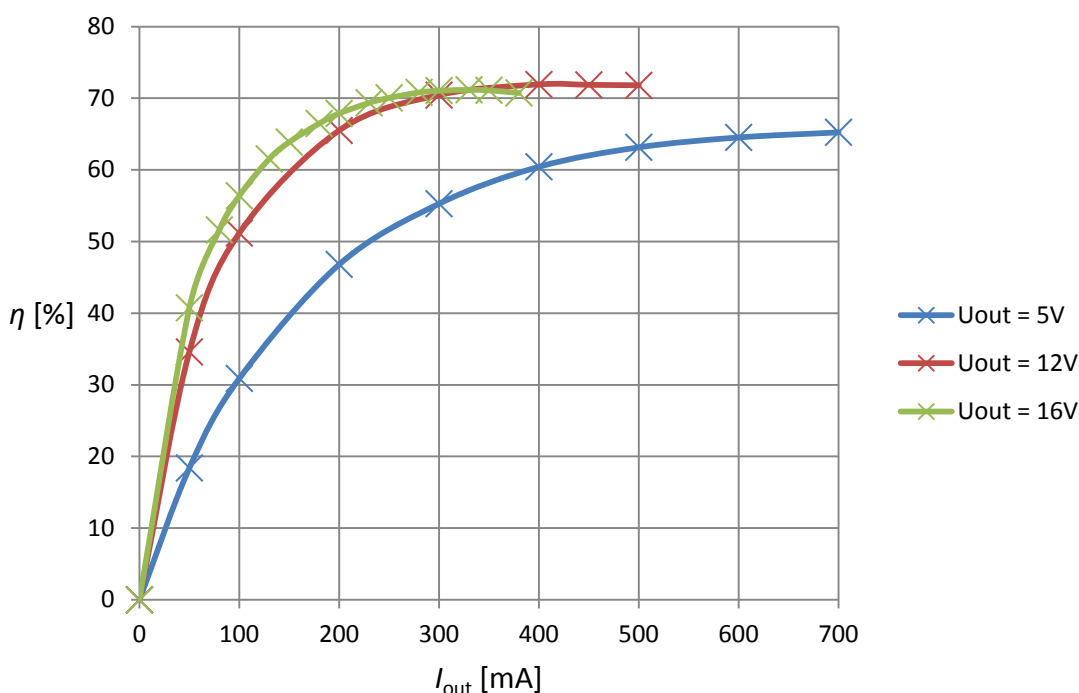
| I_{INA219} [mA] | $I_{\text{refereční}}$ [mA] | δ_I [%] |
|--------------------------|-----------------------------|----------------|
| 5 | 4,83 | 3,63 |
| 7 | 6,78 | 3,23 |
| 8 | 7,75 | 3,17 |
| 12 | 11,68 | 2,75 |
| 15 | 15,19 | -1,25 |
| 20 | 19,71 | 1,47 |
| 28 | 27,69 | 1,11 |
| 33 | 32,66 | 1,05 |
| 55 | 54,21 | 1,46 |
| 105 | 103,8 | 1,16 |
| 159 | 156,7 | 1,47 |
| 204 | 201,9 | 1,04 |
| 257 | 254,8 | 0,86 |
| 307 | 305,5 | 0,49 |
| 406 | 403,8 | 0,54 |

3.4.4 Účinnost

Při měření celkové účinnosti zdroje bylo nutné mírně zvýšit velikost vstupního napětí, jelikož při zvyšování odběru zdroje docházelo k znatelnému úbytku toho napětí na přívodních vodičích a následně k aktivaci podpět'ové ochrany, která způsobila vypnutí zdroje. Na obrázku 3.15 je zobrazena závislost účinnosti zdroje na výstupním proudu.

Měření vstupního napětí bylo prováděno na napájecích pinech USB konektoru, aby bylo zajištěno změřené účinnosti zdroje jako celku bez vlivu USB kabelu, který může mít rozdílné vlastnosti.

Teoretická maximální účinnost zdroje při zanedbání spotřeby všech podpůrných obvodů je přibližně 82%.



Obrázek 3.15 Závislost celkové účinnosti zdroje na výstupním proudu

3.4.5 Shrnutí výsledků měření

Z měření zatěžovacích charakteristik je patrné, že zdroj je poměrně tvrdý, maximální úbytek je 44 mV při proudu 700 mA při výstupním napětí přibližně 5 V. Pro vyšší výstupní napětí lze dosáhnout pouze menšího proudu, což byla i maximální hodnota při daném měření. Pokles je způsoben převážně vnitřním snímacím odporem o hodnotě 20 m Ω , na kterém vznikne úbytek napětí 14 mV při daném maximálním proudu 700 mA.

Zvlnění výstupního napětí zdroje dosahuje při největším výstupním proudu hodnoty 8,7 mV. S klesajícím proudem zvlnění klesá. Největší hodnota zvlnění výstupního napětí je 20,9 mV při výstupním napětí 16,10 V a výstupním proudu 350 mA. Tyto hodnoty zvlnění lze pokládat za přijatelné vzhledem k absenci výstupního LC filtru.

V největším počtu případů dosahuje chyba měření výstupního napětí hodnoty menší než 1 %, při nižších hodnotách je chyba větší. V případě měření výstupního proudu se pohybuje chyba nejčastěji v okolí jednoho procenta, při malých hodnotách je chyba opět větší. Vzhledem k tomu, že při měření je použit pouze jeden rozsah lze odchylky pokládat za přijatelné.

Celková účinnost zdroje dosahuje maximální hodnoty přibližně 72 %, což je uspokojivá hodnota vzhledem k použití dvou měničů řazených za sebou. Dále účinnost snižují veškeré podpůrné obvody v zapojení.

4 ZÁVĚR

Cílem zadání této práce bylo provést konstrukci malého regulovatelného zdroje napájeného z USB, s proudovou limitací, vstupními ochranami, měřením a záznamem hodnot. Požadavkem byla také možnost ovládání zdroje z počítače.

Pro návrh byl vybrán spínaný měnič, pomocí kterého lze dosáhnout vyšší účinnosti. Pro galvanickou izolaci je tomuto obvodu předřazen izolovaný prefabrikovaný měnič.

Finální konstrukce zdroje byla provedena úspěšně, mezi kroky byla simulace zapojení a výroba prototypu, což pomohlo vhodně vylepšit zapojení ještě před výrobou finální verze.

Zdroj dosahuje uspokojivé tvrdosti (maximální pokles 44 mV), rovněž uspokojivá je i přesnost měření výstupního napětí a proudu (prakticky okolo 1 %). Účinnost zdroje dosahuje nejvyšší hodnoty přibližně 72 %. Tato hodnota by mohla být vyšší především z důvodu úspory energie při napájení USB sběrnice počítače, čehož lze dosáhnout při použití jednoho měniče s čistě izolovanou topologií.

Jako nevýhoda uvedené konstrukce se dá považovat zvlnění výstupního proudu při aktivaci proudové limitace, které dosahuje hodnoty maximálně 2,8 mA. Toto zvlnění může způsobovat problémy při napájení citlivých obvodů. Další nevýhodou je minimální hodnota maximálního výstupního proudu, která činí přibližně 200 mA a nutnost dostavení hodnoty výstupního napětí, při nastavení maximálního výstupního proudu pod hodnotu přibližně 350 mA.

K ovládání zdroje přes počítač byl vytvořen pouze jednoduchý software, který sice umožňuje záznam měřených hodnot, avšak pouze do externího souboru. Nevýhodou tohoto softwaru je nulová reakce na odpojení zdroje od USB portu počítače, avšak zdroj stále měřená data stále odesílá.

LITERATURA

- [1] KREJČIŘÍK, Alexandr. *Napájecí zdroje I*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 1996, 341 s. ISBN 80-860-5602-3.
- [2] Toroidní transformátory značky Talema. *NT Magnetics* [online]. 2007 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: http://www.ntmagnetics.cz/cz/k_1_3.html
- [3] Spínané zdroje. *HW.cz* [online]. 2007 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/teorie-a-praxe/spinane-zdroje.html>
- [4] KREJČIŘÍK, Alexandr. *DC/DC měniče*. 1. vyd. Praha: BEN, 2001, 111 s. ISBN 80-730-0045-8.
- [5] VUT FIT. *Charakteristika rozhraní USB* [online]. 2014 [cit. 13.11.2015]. Dostupné z: <http://www.fit.vutbr.cz/study/courses/IPZ/public/texty/usb/usb2014.pdf>
- [6] *Universal Serial Bus* [online]. b.r. [cit. 2015-11-13]. Dostupné z: <http://www.usb.org>
- [7] Sériový port RS-232C. *Root.cz* [online]. 2008 [cit. 2015-11-08]. Dostupné z: <http://www.root.cz/clanky/seriovy-port-rs-232c/#ic=serial-box&icc=text-title>
- [8] TEXAS INSTRUMENTS. *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)* [pdf]. 2010 [cit. 11.11.2015]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ug/sprugp1/sprugp1.pdf>
- [9] NXP SEMICONDUCTORS. *I2C-bus specification and user manual* [pdf]. 2014 [cit. 11.11.2015]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/user_manual/UM10204.pdf
- [10] ATMEL. *AVR1308: Using the XMEGA TWI* [pdf]. 2008 [cit. 13.11.2015]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc8054.pdf>
- [11] MATOUŠEK, David. *Aplikace mikrokontrolérů ATmega644*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2013, ca 200 s. v různém stránkování. ISBN 978-80-7300-492-7.
- [12] LINEAR TECHNOLOGY. *40V, 1A Synchronous Buck-Boost DC/DC Converter with Programmable Output Current* [pdf]. 2014 [cit. 12.12.2015]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/31141fa.pdf>
- [13] ON SEMICONDUCTOR. *DC-DC Converters Feedback and Control*. b.r.. Dostupné také z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/TND352-D.PDF

- [14] KEITHLEY. *Stabilizing Fast Transient Response Power Supply/Load Circuits*. 2007. Dostupné také z: www.tek.com/dl/_2870_Stabilizing_AN.pdf
- [15] Resistor-Capacitor (RC) Snubber Design for Power Switches. *Digi-Key electronics* [online]. b.r. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/en/articles/techzone/2014/aug/resistor-capacitor-rc-snubber-design-for-power-switches>
- [16] NXP. *AN11160 Designing RC snubbers*. 2012. Dostupné také z: http://www.nxp.com/documents/application_note/AN11160.pdf
- [17] ON SEMICONDUCTOR. *1.0 A Low-Dropout Positive Fixed and Adjustable Voltage Regulators* [pdf]. 2014 [cit. 12.12.2014]. Dostupné z: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/NCP1117-D.PDF
- [18] Output voltage control of DC/DC converters. *Thomas Fischl* [online]. b.r. [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://www.fischl.de/dcdcccontrol/>
- [19] MICROCHIP. *Push-Pull Output Sub-Microamp Comparators* [pdf]. 2011 [cit. 12.12.2015]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/21696H.pdf>
- [20] TEXAS INSTRUMENTS. *LM4040-N/-Q1 Precision Micropower Shunt Voltage Reference*. 2015. Dostupné také z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm4040-n.pdf>
- [21] TRACO POWER. *DC/DC Converters TMR 6 Series, 6 Watt* [pdf]. 2014 [cit. 12.12.2014]. Dostupné z: <http://www.tracopower.com/products/tmr6.pdf>
- [22] TRACO POWER. *TMR 3 Series Application Note* [pdf]. 2009 [cit. 12.12.2015]. Dostupné z: <http://www.tracopower.com/products/tmr3-application.pdf>
- [23] SHARP CORPORATION. *PC3H7J00000F Series* [pdf]. 2005 [cit. 12.12.2015]. Dostupné z: http://www.sharp-world.com/products/device/lineup/data/pdf/datasheet/pc3h7_e.pdf
- [24] AVAGO TECHNOLOGIES. *Assuring Data Integrity in an Optically Isolated 3.3 V I2C Bus* [pdf]. 2010 [cit. 01.12.2015]. Dostupné z: <http://www.avagotech.com/docs/AV02-2384EN>
- [25] TEXAS INSTRUMENTS. *Zero-Drift, Bi-Directional CURRENT/POWER MONITOR with I2C™ Interface* [pdf]. 2011 [cit. 12.12.2014]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>
- [26] Understanding the INA219 I2C Current/Power Monitor. *Chris Wilson* [online]. 2014 [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://cdwilson.us/articles/understanding-the-INA219/>
- [27] ATMEL. *ATMEL 8-BIT MICROCONTROLLER WITH 4/8/16/32KBYTES IN-SYSTEM PROGRAMMABLE FLASH* [pdf]. 2014 [cit. 11.12.2015]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller->

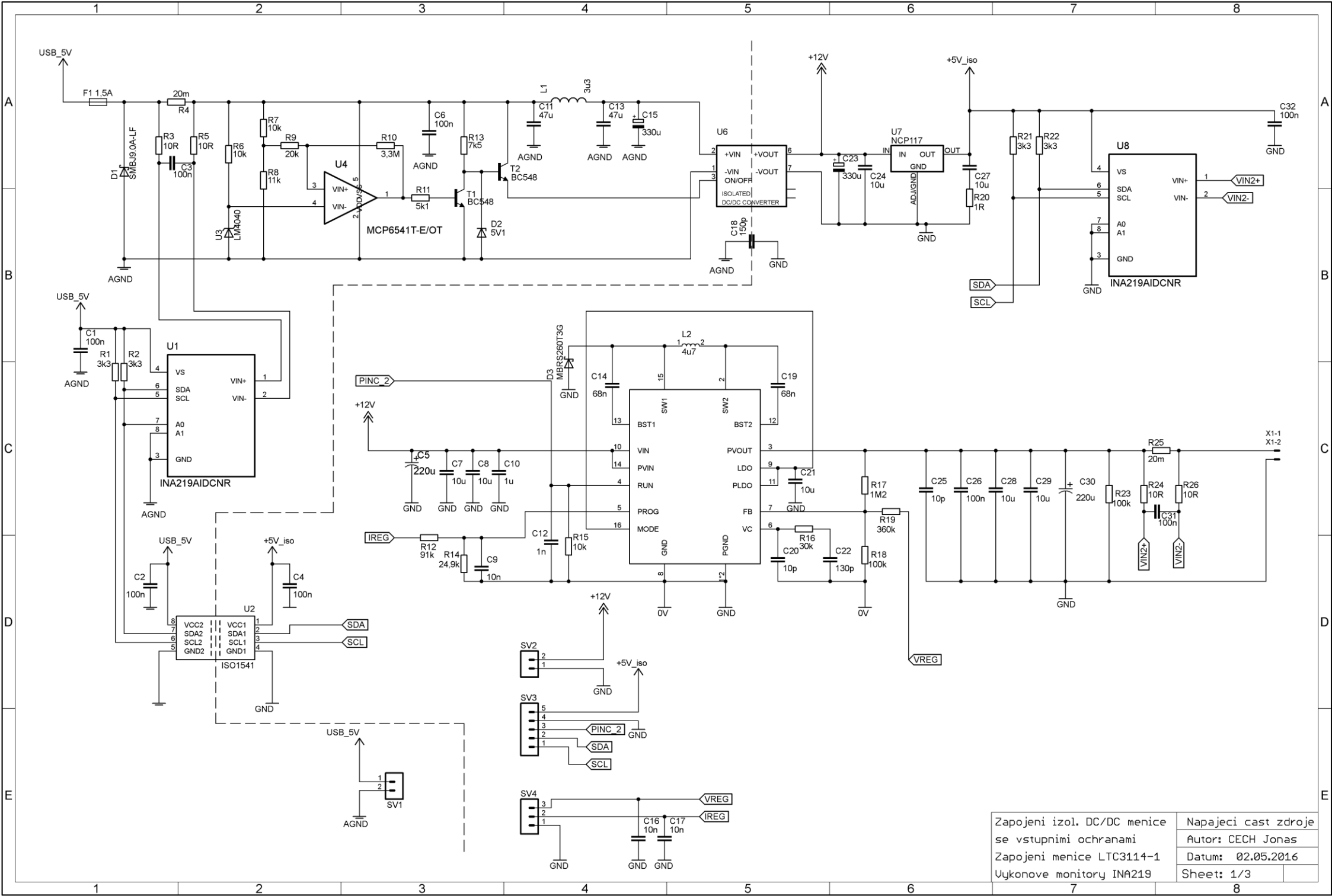
- ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf
- [28] RC Low-pass Filter Design for PWM. *OKAWA Electric Design* [online]. b.r. [cit. 2015-11-15]. Dostupné z: <http://sim.okawa-denshi.jp/en/PWMtool.php>
 - [29] TEXAS INSTRUMENTS. *Using PWM Output as a Digital-to-Analog Converter on a TMS320F280x Digital Signal Controller*. 2008. Dostupné také z: <http://www.ti.com.cn/cn/lit/an/spraa88a/spraa88a.pdf>
 - [30] FTDI CHIP. *FT232R USB UART IC* [pdf]. 2015 [cit. 12.12.2015]. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf
 - [31] FTDI CHIP. *USB Hardware Design Guidelines for FTDI ICs* [pdf]. 2013 [cit. 13.11.2015]. Dostupné z: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/AppNotes/AN_146_USB_Hardware_Design_Guidelines_for_FTDI_ICs.pdf
 - [32] *I2C master library using hardware TWI interface* [online]. 2005 [cit. 2016-03-21]. Dostupné z: <http://jump.to/fleury>
 - [33] NOVATEK. *Single-Chip 16C X 2L Dot-Matrix LCD Controller / Driver*. 2.3. 2003. Dostupné také z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/NT7603_V2.3.pdf
 - [34] Code Examples. *FTDI Chip* [online]. b.r. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://www.ftdichip.com/Support/SoftwareExamples/CodeExamples/CSharp.htm>
 - [35] Drivers. *FTDI Chip* [online]. b.r. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: <http://www.ftdichip.com/FTDrivers.htm>
 - [36] SMA. *Teplotní derating pro střídače Sunny Boy a Sunny Tripower* [pdf]. b.r. [cit. 8.12.2015]. Dostupné z: <http://files.sma.de/dl/7418/Temp-Derating-TI-cs-13.pdf>
 - [37] LINEAR TECHNOLOGY. *PCB Layout Considerations for Non-Isolated Switching Power Supplies*. 2012. Dostupné také z: <http://cds.linear.com/docs/en/application-note/an136f.pdf>
 - [38] Vést či nevést: část 2: Pokyny pro správný návrh layoutu. *DPS Elektronika od A do Z* [online]. b.r., **2011**(1) [cit. 2016-01-20].
 - [39] Understanding, Measuring, and Reducing Output Voltage Ripple. *Texas Instruments* [online]. b.r. [cit. 2016-01-20]. Dostupné z: https://e2e.ti.com/support/power_management/simple_switcher/w/simple_switcher_wiki/2243.understanding-measuring-and-reducing-output-voltage-ripple

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

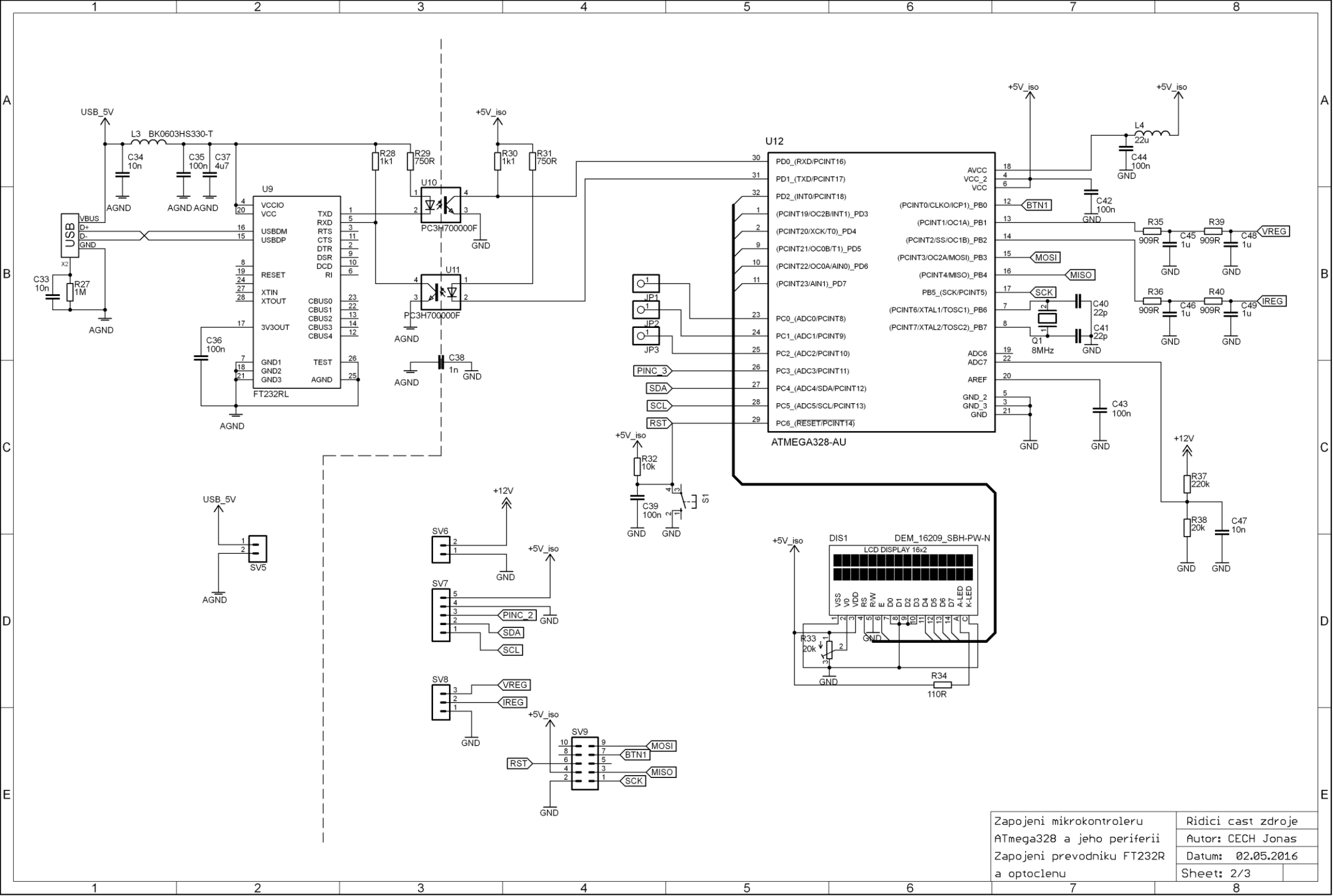
| | |
|------------------|---|
| s | Střída signálu |
| T | Perioda signálu |
| f | Frekvence signálu |
| t_{ON} | Doba zapnutí/sepnutí (tranzistoru) |
| t_{OFF} | Doba vypnutí/rozepnutí (tranzistoru) |
| N | Počet závitů vinutí |
| VF | Vysokofrekvenční |
| EMI | Elektromagnetická interference |
| DC | Stejnoseměrný proud |
| USB | Univerzální sériová sběrnice |
| UART | Univerzální asynchronní přijímač/vysílač |
| USART | Univerzální synchronní a asynchronní přijímač/vysílač |
| MCU | Mikrokontrolér |
| RxD | Přijímání dat |
| TxD | Vysílání dat |
| I2C | Inter-integrated circuit (sériová sběrnice) |
| A/D | Analogově digitální (převodník) |
| SDA | Datová linka I2C sběrnice |
| SCL | Hodinová linka I2C sběrnice |
| SLAVE | Podřízené zařízení |
| MASTER | Nadřízené zařízení |
| ACK | Acknowledge, potvrzovací bit |
| TWI | Two-wire interface (sériová sběrnice) |
| SPI | Serial Peripheral Interface |
| ESR | Ekvivalentní sériový odpor |
| GND | Společný vodič |
| PWM | Pulzně šířková modulace |
| ISP | In-system programming, programování v aplikaci |
| DPS | Deska plošných spojů |
| LDO | Stabilizátor s nízkým úbytkem napětí |

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

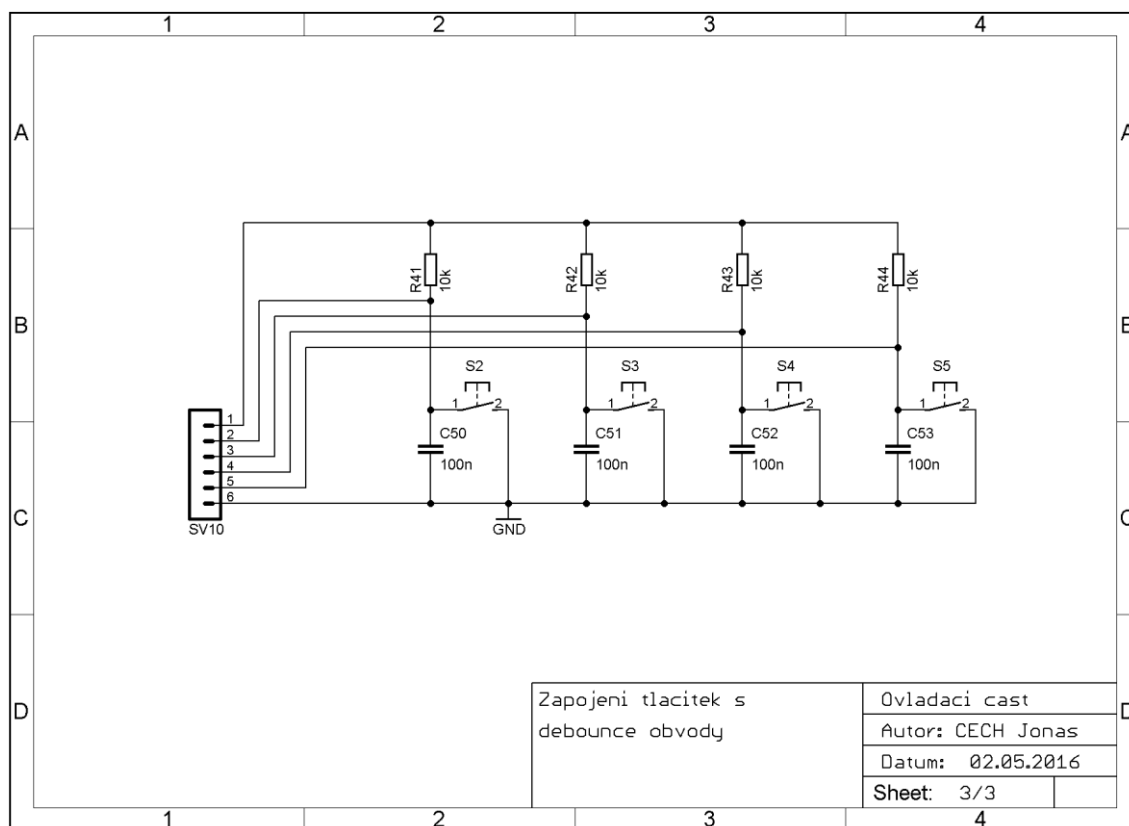
A.1 Obvodové zapojení napájecí části zdroje



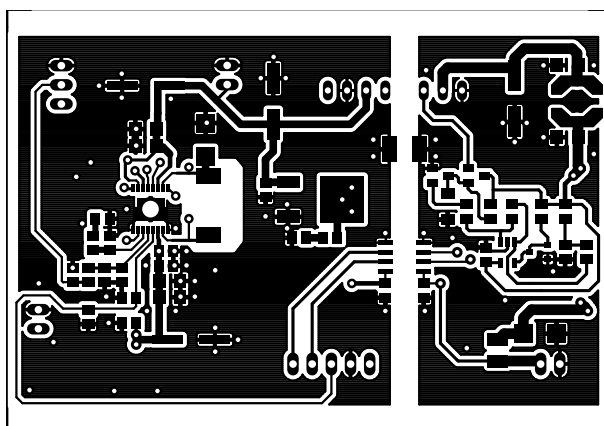
A.2 Obvodové zapojení řídicí části zdroje



A.3 Obvodové zapojení ovládací části zdroje

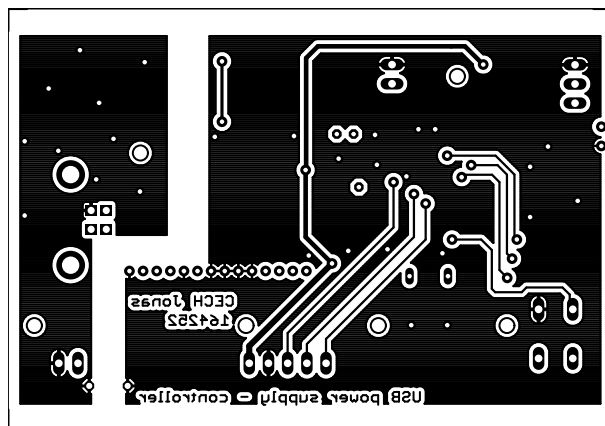


A.4 Deska plošného spoje napájecí části – top (strana součástek)



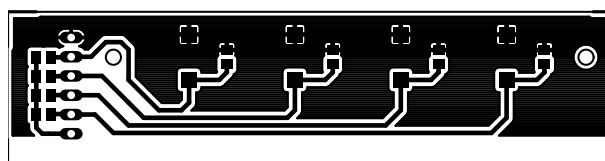
Rozměr desky 80 x 56 [mm], měřítko M1:1

A.7 Deska plošného spoje řídicí části – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 80 x 56 [mm], měřítko M1:1

A.8 Deska plošného spoje ovládací části – top (strana součástek)



Rozměr desky 80 x 20 [mm], měřítko M1:1

A.9 Deska plošného spoje ovládací části – bottom (strana spojů)



Rozměr desky 80 x 20 [mm], měřítko M1:1

B SEZNAM SOUČÁSTEK

B.1 Napájecí část

| Označení | Hodnota | Pouzdro | Popis |
|----------|-------------|----------------|----------------------------|
| C1 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C2 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C3 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C4 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C5 | 220u | CAPAE830X1050N | Elektrolytický kondenzátor |
| C6 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C7 | 10u | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C8 | 10u | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C9 | 10n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C10 | 1u | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C11 | 47u | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C12 | 1n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C13 | 47u | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C14 | 68n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C15 | 330u | 153CLV-0807 | Polymerový kondenzátor |
| C16 | 10n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C17 | 10n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C18 | 150p | C1812 | Keramický kondenzátor |
| C19 | 68n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C20 | 10p | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C21 | 10u | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C22 | 680p | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C23 | 220u | CAPAE830X1050N | Elektrolytický kondenzátor |
| C24 | 10u | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C25 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C26 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C27 | 10u | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C28 | 10u | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C29 | 10u | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C30 | 220u | CAPAE830X1050N | Elektrolytický kondenzátor |
| C31 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C32 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| D1 | SMBJ9.0A-LF | SMB | Jednosměrný transil |
| D2 | 5V1 | SOD80C | Zenerova dioda |
| D3 | MBRS260T3G | SMB | Schottkyho dioda |
| F1 | 1,5A | R1210 | Polyswitch |
| L1 | 3u3 | LPS6225 | Filtrační cívka |

| Označení | Hodnota | Pouzdro | Popis |
|----------|---------------|------------|-------------------------|
| L2 | 4u7 | SRU8028A | Spínací cívka |
| R1 | 3k3 | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R2 | 3k3 | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R3 | 10R | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R4 | 20m | M1206 | Vrstvový rezistor |
| R5 | 10R | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R6 | 10k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R7 | 10k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R8 | 11k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R9 | 20k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R10 | 3,3M | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R11 | 5k1 | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R12 | 91k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R13 | 7k5 | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R14 | 24,9k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R15 | 10k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R16 | 22,1k | R0805 | Vrstvový rezistor |
| R17 | 1M2 | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R18 | 100k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R19 | 360k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R20 | 1R | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R21 | 3k3 | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R22 | 3k3 | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R23 | 100k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R24 | 10R | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R25 | 20m | M1206 | Vrstvový rezistor |
| R26 | 10R | M0805 | Vrstvový rezistor |
| SV1 | | MA02-1 | Pinová lišta |
| SV2 | | MA02-1 | Pinová lišta |
| SV3 | | MA05-1 | Pinová lišta |
| SV4 | | MA03-1 | Pinová lišta |
| T1 | BC548 | SOT23-BEC | NPN tranzistor |
| T2 | BC548 | SOT23-BEC | NPN tranzistor |
| U1 | INA219AIDCNR | SOT65P | Power monitor |
| U2 | ISO1541 | PSO-G8 | I2C izolátor |
| U3 | LM4040 | SOT23 | Napěťová reference |
| U4 | MCP6541T-E/OT | SOT95P | Komparátor |
| U5 | LTC3114-1 | TSSOP16EXP | Integrovaný DC/DC měnič |
| U6 | TMR6-0512 | TMR6 | Izolovaný DC/DC měnič |
| U7 | NCP117 | DPAK | Lineární stabilizátor |
| U8 | INA219AIDCNR | SOT65P | Power monitor |
| X1 | | 22-23-2021 | Výstupní DPS konektor |

B.2 Řídící část

| Označení | Hodnota | Pouzdro | Popis |
|----------|--------------------|--------------|-----------------------|
| C33 | 10n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C34 | 10n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C35 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C36 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C37 | 4u7 | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C38 | 1n | C050-024X044 | Fóliový kondenzátor |
| C39 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C40 | 22p | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C41 | 22p | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C42 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C43 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C44 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C45 | 1u | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C46 | 1u | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C47 | 10n | C0805 | Keramický kondenzátor |
| C48 | 1u | C1206 | Keramický kondenzátor |
| C49 | 1u | C1206 | Keramický kondenzátor |
| DIS1 | DEM_16209_SBH-PW-N | DEM_16209 | LCD displej |
| L3 | BK0603HS330-T | L2012C | Odrušovací cívka |
| L4 | 22u | L4532M | Filtrační cívka |
| Q1 | 8MHz | QS | Krystal |
| R27 | 1M | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R28 | 1k1 | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R29 | 750R | M1206 | Vrstvový rezistor |
| R30 | 1k1 | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R31 | 750R | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R32 | 10k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R33 | 20k | RTRIM4G/J | Odporový trimr |
| R34 | 110R | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R35 | 909R | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R36 | 909R | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R37 | 220k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R38 | 20k | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R39 | 909R | M0805 | Vrstvový rezistor |
| R40 | 909R | M0805 | Vrstvový rezistor |
| S1 | | B3F-10XX | Mikrospínač |
| SV5 | | MA02-1 | Dutinková lišta |
| SV6 | | MA02-1 | Dutinková lišta |
| SV7 | | MA05-1 | Dutinková lišta |
| SV8 | | MA03-1 | Dutinková lišta |

| Označení | Hodnota | Pouzdro | Popis |
|----------|--------------|---------|--------------------|
| SV9 | | 2X5P | Pinová lišta |
| U9 | FT232RL | SSOP-28 | Převodník USB/UART |
| U10 | PC3H700000F | SMD4 | Optočlen |
| U11 | PC3H700000F | SMD4 | Optočlen |
| U12 | ATMEGA328-AU | QFP80P | Mikrokontrolér |
| X2 | USB-B | USB-B-H | USB konektor |

B.3 Ovládací část

| Označení | Hodnota | Pouzdro | Popis |
|----------|---------|-------------|----------------------------------|
| C50 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor - neosazen |
| C51 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor - neosazen |
| C52 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor - neosazen |
| C53 | 100n | C0805 | Keramický kondenzátor - neosazen |
| R41 | 10k | M0805 | Vrstvový rezistor - neosazen |
| R42 | 10k | M0805 | Vrstvový rezistor - neosazen |
| R43 | 10k | M0805 | Vrstvový rezistor - neosazen |
| R44 | 10k | M0805 | Vrstvový rezistor - neosazen |
| S2 | | B3AL | Tlačítko |
| S3 | | B3AL | Tlačítko |
| S4 | | B3AL | Tlačítko |
| S5 | | B3AL | Tlačítko |
| X3 | | M50-3300542 | Konektor IDC/IDT |

B.4 Vnější součástky

| Označení | Hodnota | Pouzdro | Popis |
|----------|---------|----------|-------------------------------|
| | | 1457C802 | Přístrojová krabice |
| | | 24.247.5 | Panelová zdířka 4mm - modrá |
| | | 24.247.1 | Panelová zdířka 4mm - červená |

C TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT PRO PROTOTYP

C.1 Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 5,215 \text{ V}$

| $U_{in} [\text{V}]$ | $I_{in} [\text{mA}]$ | $U_{out} [\text{V}]$ | $I_{out} [\text{mA}]$ | $\eta [\%]$ |
|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------|
| 12,01 | 10 | 5,215 | 0 | 0,0 |
| 12,01 | 30 | 5,205 | 50 | 69,4 |
| 12,01 | 50 | 5,199 | 100 | 83,2 |
| 12,01 | 70 | 5,189 | 150 | 89,0 |
| 12,01 | 100 | 5,179 | 200 | 82,9 |
| 12,01 | 120 | 5,177 | 250 | 86,3 |
| 12,01 | 140 | 5,174 | 300 | 88,7 |
| 12,01 | 190 | 5,169 | 400 | 87,1 |
| 12,01 | 230 | 5,169 | 500 | 89,9 |
| 12,01 | 280 | 5,162 | 600 | 88,5 |
| 12,01 | 340 | 5,154 | 700 | 84,9 |
| 12,01 | 370 | 5,139 | 746 | 82,9 |

C.2 Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 12,1 \text{ V}$

| $U_{in} [\text{V}]$ | $I_{in} [\text{mA}]$ | $U_{out} [\text{V}]$ | $I_{out} [\text{mA}]$ | $\eta [\%]$ |
|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------|
| 12,01 | 20 | 12,1 | 0 | 0,0 |
| 12,01 | 120 | 12,05 | 100 | 80,3 |
| 12,01 | 220 | 12,05 | 200 | 87,6 |
| 12,01 | 320 | 12,04 | 300 | 90,3 |
| 12,01 | 430 | 12,04 | 400 | 89,6 |
| 12,01 | 480 | 12,04 | 450 | 90,3 |
| 12,01 | 500 | 12,04 | 470 | 90,5 |

C.3 Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 16,27 \text{ V}$

| $U_{in} [\text{V}]$ | $I_{in} [\text{mA}]$ | $U_{out} [\text{V}]$ | $I_{out} [\text{mA}]$ | $\eta [\%]$ |
|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-------------|
| 12,01 | 30 | 16,27 | 0 | 0,0 |
| 12,01 | 90 | 16,25 | 50 | 72,2 |
| 12,01 | 160 | 16,24 | 100 | 81,2 |
| 12,01 | 220 | 16,24 | 150 | 88,6 |
| 12,01 | 290 | 16,23 | 200 | 89,5 |

| U_{in} [V] | I_{in} [mA] | U_{out} [V] | I_{out} [mA] | η [%] |
|---------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|------------|
| 12,01 | 370 | 16,23 | 250 | 87,7 |
| 12,01 | 430 | 16,23 | 290 | 87,6 |

D TABULKY NAMĚŘENÝCH HODNOT PRO FINÁLNÍ VERZI ZDROJE

D.1 Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 5,052V$

| U_{in} [V] | I_{in} [mA] | U_{out} [V] | I_{out} [mA] | η [%] |
|--------------|---------------|---------------|----------------|------------|
| 5,565 | 203 | 5,052 | 0 | 0 |
| 5,532 | 248 | 5,047 | 50 | 18,4 |
| 5,495 | 297 | 5,041 | 100 | 30,9 |
| 5,417 | 397 | 5,032 | 200 | 46,8 |
| 5,328 | 512 | 5,026 | 300 | 55,3 |
| 5,234 | 635 | 5,021 | 400 | 60,4 |
| 5,127 | 775 | 5,018 | 500 | 63,1 |
| 5,008 | 931 | 5,014 | 600 | 64,5 |
| 4,872 | 1103 | 5,008 | 700 | 65,2 |

D.2 Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 11,992V$

| U_{in} [V] | I_{in} [mA] | U_{out} [V] | I_{out} [mA] | η [%] |
|--------------|---------------|---------------|----------------|------------|
| 5,778 | 200 | 11,992 | 0 | 0,0 |
| 5,699 | 304 | 11,984 | 50 | 34,6 |
| 5,613 | 417 | 11,978 | 100 | 51,2 |
| 5,416 | 675 | 11,971 | 200 | 65,5 |
| 5,18 | 984 | 11,967 | 300 | 70,4 |
| 5,05 | 1318 | 11,965 | 400 | 71,9 |
| 4,872 | 1538 | 11,964 | 450 | 71,8 |
| 4,957 | 1681 | 11,964 | 500 | 71,8 |

D.3 Zatěžovací charakteristika pro $U_{out0} = 16,045V$

| U_{in} [V] | I_{in} [mA] | U_{out} [V] | I_{out} [mA] | η [%] |
|--------------|---------------|---------------|----------------|------------|
| 6,048 | 195 | 16,045 | 0 | 0,0 |
| 5,944 | 331 | 16,031 | 50 | 40,7 |
| 5,873 | 423 | 16,027 | 80 | 51,6 |
| 5,824 | 488 | 16,025 | 100 | 56,4 |
| 5,747 | 589 | 16,022 | 130 | 61,5 |
| 5,692 | 661 | 16,022 | 150 | 63,9 |
| 5,605 | 774 | 16,021 | 180 | 66,5 |
| 5,547 | 851 | 16,02 | 200 | 67,9 |

| U_{in} [V] | I_{in} [mA] | U_{out} [V] | I_{out} [mA] | η [%] |
|--------------|---------------|---------------|----------------|------------|
| 5,454 | 974 | 16,019 | 230 | 69,4 |
| 5,388 | 1061 | 16,019 | 250 | 70,1 |
| 5,283 | 1199 | 16,019 | 280 | 70,8 |
| 5,207 | 1299 | 16,019 | 300 | 71,0 |
| 5,087 | 1460 | 16,019 | 330 | 71,2 |
| 4,997 | 1578 | 16,019 | 350 | 71,1 |
| 4,845 | 1776 | 16,019 | 380 | 70,7 |

D.4 Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu $U_{out0} = 5,12V$

| I_{out} [mA] | $U_{out,p-p}$ [V] |
|----------------|-------------------|
| 0 | 3,5 |
| 100 | 5,8 |
| 200 | 7,1 |
| 300 | 7,6 |
| 400 | 7,9 |
| 500 | 8,1 |
| 600 | 8,4 |
| 700 | 8,7 |
| 800 | 9,3 |

D.5 Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu $U_{out0} = 12,06V$

| I_{out} [mA] | $U_{out,p-p}$ [V] |
|----------------|-------------------|
| 0 | 3,6 |
| 50 | 5,3 |
| 100 | 7,1 |
| 200 | 9,8 |
| 300 | 10,1 |
| 400 | 12,5 |
| 500 | 14,3 |

D.6 Závislost zvlnění výstupního napětí na výstupním proudu $U_{\text{out0}} = 16,10\text{V}$

| I_{out} [mA] | $U_{\text{out,p-p}}$ [V] |
|-----------------------|--------------------------|
| 0 | 3,2 |
| 50 | 7,2 |
| 100 | 9,5 |
| 150 | 11,7 |
| 200 | 15,7 |
| 250 | 15,8 |
| 300 | 17,5 |
| 350 | 20,9 |

E FOTO VÝSLEDNÉHO ZAŘÍZENÍ

E.1 Funkční zkonstruovaný zdroj

